



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPOTZALCO

División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Posgrado en Ingeniería Estructural

Estudio Experimental en Contravientos
Desadheridos

T E S I S

Que como requisito para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Estructural

Presenta
Eduardo Gama Estrada

Director de Tesis
Dr. Danny Arroyo Espinoza

México, D. F. junio del 2010

A mis padres, hermanos y para
Megan, Montse y Ana Paola (†) por
supuesto.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud y agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de alguna u otra manera permitieron la realización de este trabajo de tesis.

En primer lugar agradezco al Sr. David Gama Bravo y la Sra. Inés Estrada Bustos por el sacrificio hecho durante toda su vida, por todas sus enseñanzas y sabiduría. A mis hermanos Marcos M., Erika, Ana Bertha y Lluvia Selene por su paciencia y apoyo.

Al Dr. Danny Arroyo Espinoza por el apoyo brindado como director de tesis durante el tiempo que tomó el desarrollo de la misma. Aprovecho también agradecer la paciencia y motivación que de él deriva su ejemplo y dedicación.

Agradezco al Dr. Roberto Melli Piralla y en especial, al Dr. Juan Casillas García de León por su amable e incondicional ayuda con respecto a las valiosas sugerencias y comentarios derivados de la revisión exhaustiva de la tesis.

A los alumnos de la carrera de Ingeniería Civil Juan Luis López, Ricardo Martínez y Edgar Cuadros; a la Sra. Silvia Ledesma; a los técnicos Rubén Barrera, José Luis Caballero y Juan Mateos; a los ingenieros Rodrigo Santos y Héctor Díaz, al profesor Juan José Guerrero; y especialmente, al profesor Leopoldo Quiroz Soto (†) por el apoyo brindado en el desarrollo de la presente tesis.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, en especial al área de estructuras, por ofrecer una educación de calidad que me ha permitido desarrollar personal y profesionalmente.

Quiero expresar mi más sincero reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante el tiempo de mis estudios de maestría.

Finalmente, pero no menos importante, reconozco el acompañamiento físico o en la distancia, de las personas que en todo momento me brindaron su apoyo para seguir adelante, la lista resulta extensa por lo que no la describo. Así mismo, agradezco a todos aquellos que de alguna manera participaron durante la ejecución de esta investigación. A todos ellos, MIL GRACIAS.

Índice

Capítulo 1		
1.1	Antecedentes	1
1.2	Alcance	3
Capítulo 2		
2.1	Fabricación del dispositivo de carga	4
2.2	Prueba de carga del dispositivo	12
Capítulo 3		
3.1	Materiales y propiedades geométricas	13
3.2	Instrumentación	17
Capítulo 4		
4.1	Ensayo de especímenes	19
4.2	Resultados	20
Capítulo 5		
	Análisis de resultados	36
Capítulo 6		
	Conclusiones	40
Referencias		41

Lista de figuras

<i>Figura 1.1 Contraviento desadherido a escala desarrollado por Gama (2006)</i>	2
<i>Figura 1.2. Ciclo histerético utilizado en Gama (2006)</i>	2
<i>Figura 2.1. Marco de Reacción y dispositivo de carga</i>	4
<i>Figura 2.2. Cilindro hidráulico</i>	4
<i>Figura 2.3. Celda de Carga</i>	5
<i>Figura 2.4. Equipo de adquisición de datos</i>	5
<i>Figura 2.5. Alineación del contraviento con el cilindro hidráulico y la celda</i>	5
<i>Figura 2.6. Alineación del contraviento con el cilindro hidráulico y la celda</i>	6
<i>Figura 2.7. Piezas del dispositivo de carga</i>	6
<i>Figura 2.8. Dispositivo de carga y contraviento</i>	7
<i>Figura 2.9. Soporte móvil</i>	7
<i>Figura 2.10. Conector de celda de carga existente</i>	8
<i>Figuras 2.11 y 2.12. Soporte del cilindro hidráulico</i>	8
<i>Figura 2.13 y 2.14. Guía de control</i>	9
<i>Figura 2.15. Soporte fijo</i>	9
<i>Figura 2.16. Soporte fijo</i>	10
<i>Figura 2.17 y 2.18. Placas de protección</i>	10
<i>Figura 2.19. Dispositivo en marco de reacción</i>	11
<i>Figuras 2.20, 2.21 y 2.22. Micrómetros en el dispositivo de carga</i>	12
<i>Figuras 3.1 y 3.2 Arreglo interno de los contravientos en estudio</i>	13
<i>Figura 3.3 Arreglo de contravientos en estudio</i>	14
<i>Figuras 3.4 y 3.5 Refuerzo en el extremo</i>	14
<i>Figura. 3.6 Gráfica esf-def del acero utilizado en el arreglo de tubos de la primera etapa</i>	16
<i>Figura. 3.7 Gráfica esf-def del acero utilizado el arreglo de ángulos</i>	16
<i>Figura. 3.8 Gráfica esf-def del acero utilizado en el arreglo de tubo de la segunda etapa</i>	16
<i>Figs. 3.9 y 3.10 Prueba de tensión del tubo utilizado en la segunda etapa</i>	17
<i>Figuras 3.11 y 3.12 Colocación de deformímetros eléctricos (Strain Gages)</i>	18
<i>Figura 3.13 Colocación de micrómetros externos</i>	18
<i>Figura 4.1. Patrón de desplazamientos para los especímenes 1 a 6</i>	19
<i>Figura 4.2. Patrón de desplazamientos para los especímenes 7, 9 y 14</i>	19
<i>Figura 4.3. Patrón de desplazamientos para los especímenes 8, 10, 11 y 12</i>	19
<i>Figura 4.4. Diagramas de histéresis del espécimen 1</i>	21
<i>Figuras 4.5 y 4.6. Ensayo del espécimen 1</i>	22
<i>Figura 4.7. Diagramas de histéresis del espécimen 2</i>	22
<i>Figura 4.8. Diagramas de histéresis del espécimen 3</i>	23
<i>Figura 4.9. Diagramas de histéresis del espécimen 4</i>	25
<i>Figura 4.10. Diagramas de histéresis del espécimen 5</i>	26
<i>Figura 4.11. Diagramas de histéresis del espécimen 6</i>	27
<i>Figuras 4.12 y 4.13. Ensayo del espécimen 6</i>	28
<i>Figura 4.14. Diagrama de histéresis del espécimen 7</i>	29
<i>Figura 4.15. Ensayo del espécimen 7</i>	29
<i>Figura 4.16. Diagrama de histéresis del espécimen 8</i>	30
<i>Figuras 4.17 y 4.18. Ensayo del espécimen 8</i>	31
<i>Figura 4.19. Diagrama de histéresis del espécimen 9</i>	31
<i>Figuras 4.22 y 4.23. Núcleo del espécimen 9</i>	32
<i>Figura 4.24. Diagrama de histéresis del espécimen 10</i>	32
<i>Figura 4.25. Diagrama de histéresis del espécimen 12</i>	33
<i>Figura 4.26. Diagrama esfuerzo-deformación del espécimen 13</i>	34
<i>Figura 4.27. Diagrama de histéresis del espécimen 14</i>	36

<i>Figura 5.1. Diagrama de Amplitudes y desadherencia del espécimen 2</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5.2. Diagrama de Amplitudes y desadherencia del espécimen 3</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.3. Diagrama de Amplitudes y desadherencia del espécimen 4</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.4. Diagrama de Amplitudes y desadherencia del espécimen 7</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.5. Diagrama de Amplitudes y desadherencia del espécimen 9</i>	<i>39</i>

Introducción

En años recientes, se han desarrollado nuevas tecnologías para el control de la respuesta de estructuras ante la excitación sísmica, tales como disipadores de energía, aisladores de base, contravientos desadheridos, etc. Bajo ciertas circunstancias, este tipo de dispositivos permite mejorar el desempeño estructural para diferentes estados límite considerados en el diseño de una estructura.

En particular, alguna ventaja de añadir dispositivos disipadores de energía a las estructuras es que, bajo ciertas condiciones, disminuyen las velocidades, aceleraciones y fuerzas cortantes de entrepiso y permiten un mejor control de la distribución del daño en los elementos que forman la estructura.

Un contraviento desadherido es un contraviento de acero con un encamisado metálico relleno de concreto o mortero que sirve como material confinante. A diferencia de un contraviento tradicional, este dispositivo puede desarrollar una gran capacidad de disipación de energía debido a que su encamisado lo protege contra pandeo.

Sin embargo, para que un contraviento desadherido conduzca a un buen comportamiento estructural debe cumplir con ciertos requisitos, tales como su resistencia a tensión y compresión deben ser muy parecidas, el encamisado debe tener la rigidez suficiente para evitar el pandeo del contraviento y debe tener un comportamiento histerético estable.

El término desadherido se refiere al hecho de que el núcleo de acero se aísla del material confinante; es decir, que se impide interacción en la interface entre ambos materiales. Esto se hace con el fin de evitar que la resistencia a compresión de la barra sea significativamente mayor que su resistencia a tensión (Tremblay 2003, Uang 2003, Sabelli 2000) y para evitar la aparición de fuerzas adicionales en los elementos en los que se conecta a los contravientos. La adherencia en los contravientos puede dar lugar a situaciones en las que el desequilibrio entre las fuerzas de compresión y tensión de dos contravientos que se intersectan en el centro del claro de una viga, induzca en ella fuerzas cortantes tan elevadas que dificulten el diseño de la viga, y puedan causar un desempeño sísmico deficiente de la misma.

Entre las características que debe cumplir el material antiadherente, además de lo discutido anteriormente, se encuentran: A) Evitar la fricción, a través de aportar suficiente espacio para acomodar la expansión del área de la sección transversal de la barra de acero; B) Ser resistente al efecto de deslizamiento que se presente en el dispositivo por efectos de gravedad; C) Ser fácilmente adquirible y; D) Permitir su fácil colocación. Una discusión mas detallada del concepto y uso de contravientos desadheridos puede encontrarse en Uang (2003), Teran y Virto (2006), Virto (2006), Tremblay (2006), Coeto (2008) y Gama (2008).

Diferentes estudios analíticos han mostrado que es factible el uso de contravientos desadheridos para estructuras de mediana y gran altura ubicadas en la zona del lago del Distrito Federal (Teran y Virto 2005, Coeto y Teran 2007, Coeto 2008), donde, debido a las condiciones geotécnicas, el uso de sistemas estructuras comunes se vuelve difícil desde el punto de vista de comportamiento sísmico.

Por lo tanto, se decidió iniciar un programa experimental encaminado a desarrollar un contraviento desadherido para aplicarlo en nuestro país. Dicho programa consta de distintas etapas. La primera etapa comprende la construcción y prueba del dispositivo de carga. La segunda comprende la construcción y ensaye de contravientos sometidos a carga cíclica reversible, con diferentes configuraciones de núcleo y material confinante.

Los especímenes estudiados estaban compuestos por perfiles de acero laminado utilizados como camisa, ángulos y tubos de acero laminado como núcleo, mortero como material confinante y, como material antiadherente, cinta plástica, cinta teflón, silicón, goma y pintura vinil-plástica; todo esto para definir los materiales que conduzcan al mejor comportamiento en los especímenes. Para obtener las dimensiones de los modelos se aplicaron los conceptos desarrollados por Virto (2006).

Los modelos se sometieron a series de ensayos de carga estática monotónicamente creciente y cíclica reversible.

Con la finalidad de conocer el comportamiento del elemento a nivel local y global, los modelos fueron instrumentados con transductores de desplazamiento y deformación. Durante los ensayos se llevó un registro detallado de la fluencia del material, los niveles de carga, las deformaciones puntuales en el espécimen, los desplazamientos relativos en el espécimen y además los desplazamientos en el dispositivo de carga.

En el capítulo 2 se describen la preparación del lugar de ensayos, la construcción del dispositivo de carga y su colocación en el marco de reacción así como la prueba de carga en el dispositivo.

En el capítulo 3 se hace una descripción detallada de la fabricación de los especímenes así como de las variaciones en la construcción y de los materiales tales como la camisa, el núcleo de acero en sus diferentes arreglos, el número y colocación de transductores de deformación, los distintos materiales antiadherentes, el mortero, etc.

En el capítulo 4 se explica el procedimiento de prueba de especímenes, las historias de carga y desplazamientos utilizados y los ciclos histeréticos obtenidos para cada canal de prueba.

En el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos en las pruebas y se evalúa el comportamiento de cada elemento.

En capítulo 6 se presentan conclusiones y recomendaciones, además de la metodología de construcción del contraviento que mejores resultados dio en los ensayos mostrados en el capítulo 4.

Capítulo 1

1.1 Antecedentes

El uso de contravientos restringidos contra pandeo ha comenzado a extenderse en diferentes países. En Japón existen cerca de 250 edificios cuyo sistema sismorresistente principal consiste en sistemas de contravientos restringidos contra pandeo; en la India, Taiwán y EE.UU. también ha habido desarrollos experimentales de importancia y se han construido 25 edificios que utilizan este tipo de dispositivo (Uang 2003).

Los contravientos restringidos contra pandeo deben exhibir un comportamiento histerético estable, además de resistencias a tensión y compresión similares, para que su uso conduzca a un adecuado comportamiento estructural.

Diferentes investigadores han desarrollado diversos tipos de contravientos restringidos contra pandeo; en general, se ha observado que estos elementos tienen un comportamiento satisfactorio (Uang 2003, Tremblay 2006). Se han reportado diferencias entre la resistencia a compresión y tensión del orden del 10% para demandas de ductilidad pequeñas y del orden del 30% para demandas de ductilidad grandes.

Otros estudios (Virto 2006, Coeto 2008,) han mostrado que el uso de este sistema es razonable para edificios ubicados en suelos blandos cuando su periodo coincide o está cercano al periodo dominante del terreno y han propuesto una metodología de diseño (Coeto 2008) para el diseño de estructuras de gran altura con este tipo de configuración estructural, utilizando un sistema gravitacional soportado por marcos y un sistema sismorresistente soportado por contravientos desadheridos.

Sin embargo, la aplicación de dichos dispositivos a edificaciones en nuestro país es difícil dado que los dispositivos desarrollados están patentados y, por lo tanto, su uso tiene impacto importante en el costo de la edificación. Además, de que no se cuenta con una metodología de diseño de este tipo de sistema estructural que considere las características de los movimientos sísmicos que se presentan en nuestro país.

Por ello, se decidió iniciar un proyecto de investigación experimental encaminado a desarrollar un contraviento restringido contra pandeo que pudiera ser utilizado en nuestro país.

El trabajo presentado en esta tesis tiene como antecedente directo el estudio desarrollado por Gama (2006) donde se estudió el comportamiento de contravientos restringidos contra pandeo a escala. La figura 1.1 muestra un ensayo de dicho estudio; en particular, se logró una diferencia entre resistencias a tensión y compresión entre 11% y 30% para amplitudes pequeñas y grandes, respectivamente.



Figura 1.1 Contraviento desadherido a escala desarrollado por Gama (2006)

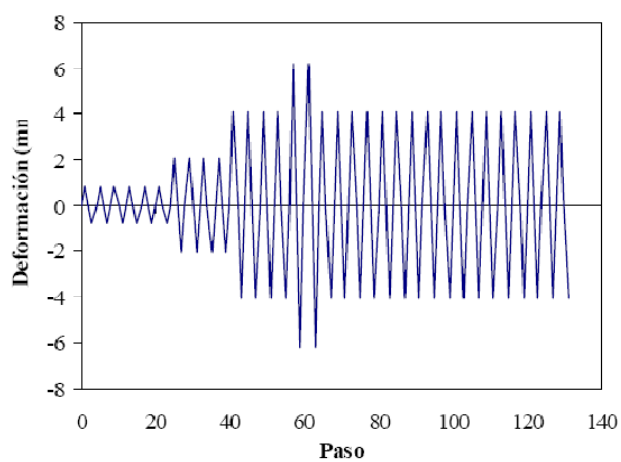


Figura 1.2. Ciclo histerético utilizado en Gama (2006)

Se observó que el dispositivo de carga mostrado en la figura 1.1 no era adecuado, por lo que para el trabajo desarrollado en esta tesis se diseñó un nuevo dispositivo de carga.

1.2 Alcance

El presente trabajo forma parte de una serie de estudios desarrollados en México para obtener un sistema pasivo de disipación de energía basado en el uso de contravientos restringidos contra pandeo.

En particular, esta investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de este tipo de elemento estructural, con los arreglos que se mostrarán en el capítulo 3, en cuanto a su estabilidad del ciclo histerético y la diferencia entre su resistencia a tensión y a compresión. En total se realizaron ensayos en 14 contravientos.

Cabe aclarar que en esta etapa del estudio experimental sólo se estudiará el desempeño del contraviento a nivel local. Otros aspectos, como las conexiones y la interacción con otros elementos estructurales, no se consideran en este trabajo.

Capítulo 2

2.1 Fabricación del dispositivo de carga

La fabricación del dispositivo de carga para realizar los estudios aquí reportados se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Para realizar los ensayos el dispositivo de carga fue colocado en uno de los espacios del marco de reacción del laboratorio, como se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.1. Marco de Reacción y dispositivo de carga

Para su construcción se utilizaron placas y perfiles de acero estructural A-36, además de algunos recursos existentes en el laboratorio habilitados para su uso en dicho dispositivo.

Para los ensayos se usaron además otros elementos tales como los cilindros hidráulicos, con los cuales serán aplicadas las cargas al contraviento; celda de carga, la cual transmite información de las fuerzas aplicadas al sistema; micrómetros o transductores, que son los lectores del desplazamiento externo con los que se controlará la prueba y un sistema de adquisición de datos. En las figuras 2.2 a 2.4 Se muestran dichos elementos.



Figura 2.2. Cilindro hidráulico



Figura 2.3. Celda de Carga



Figura 2.4. Equipo de adquisición de datos

Una característica importante que debe tener el dispositivo de carga es que durante la aplicación de la carga debe evitar inducir excentricidades al elemento ensayado. Por lo tanto el contraviento, la celda de carga y el cilindro hidráulico deben permanecer alineados (como se muestra en la figuras 2.5 Y 2.6) durante toda la duración de la prueba.

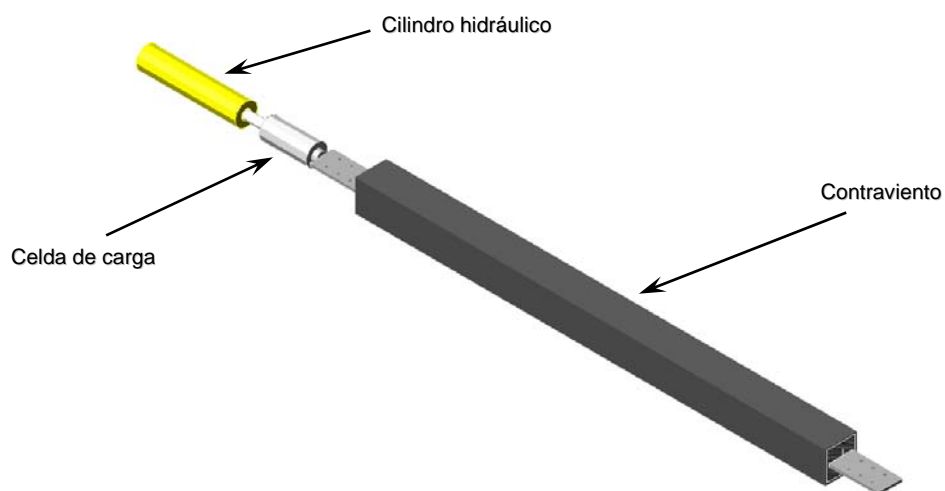


Figura 2.5. Alineación del contraviento con el cilindro hidráulico y la celda



Figura 2.6. Alineación del contraviento con el cilindro hidráulico y la celda

En las figuras 2.7 y 2.8 se muestran esquemas de los componentes del dispositivo de carga y el conjunto del dispositivo con el cilindro hidráulico, la celda de carga y el contraviento.

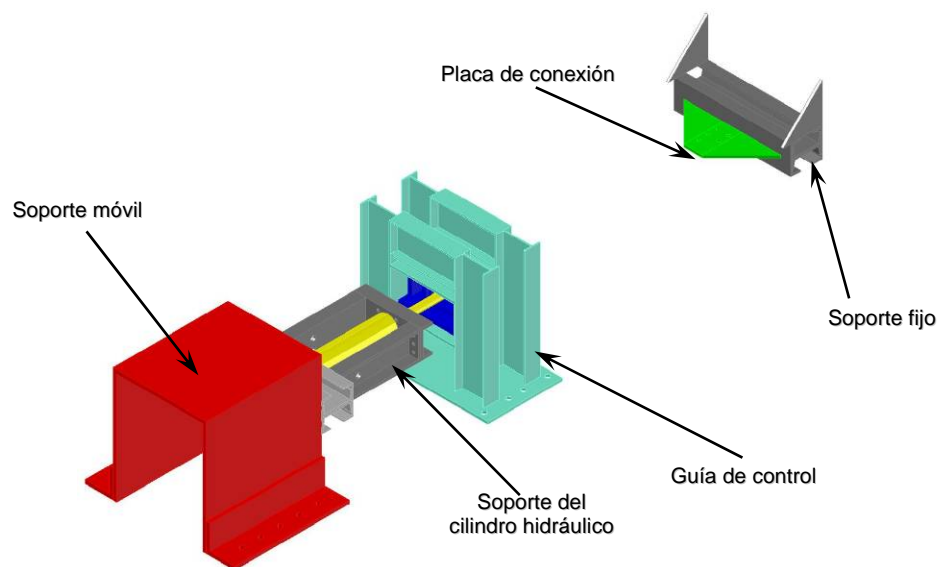


Figura 2.7. Piezas del dispositivo de carga

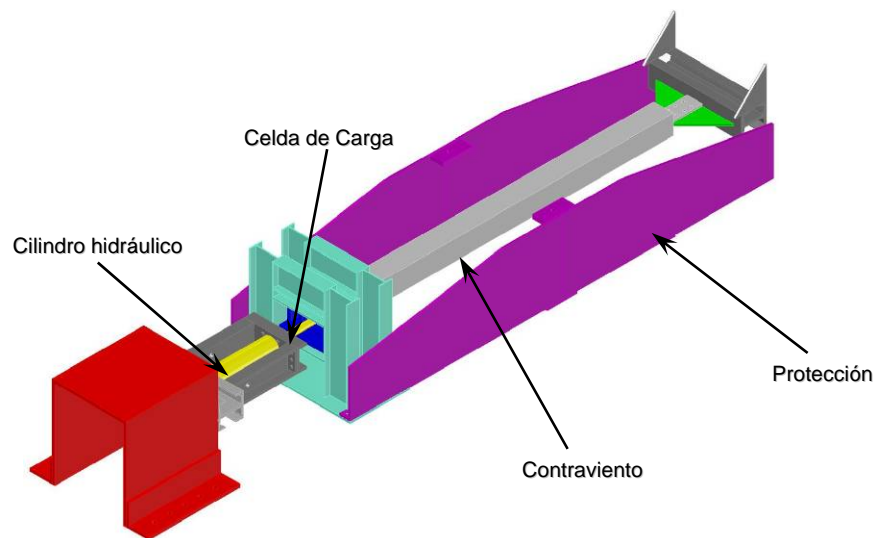


Figura 2.8. Dispositivo de carga y contraviento

Los elementos del dispositivo de carga fueron diseñados para soportar los esfuerzos generados en ellos durante los ensayos sin sufrir deformaciones significativas que pudieran afectar las mediciones durante el ensaye.

A continuación se presenta una breve descripción de los componentes del dispositivo de carga.

- Soporte móvil (figura 2.9). Este elemento se fija al piso de reacción por medio de tornillos y su función es soportar al cilindro hidráulico. Dado que la resistencia por fricción de los tornillos no fue suficiente para evitar el deslizamiento del elemento se decidió fijarlo al piso de reacción mediante soldadura. Se le dio el nombre de soporte móvil debido a que puede ajustarse para acomodar contravientos de diferentes tamaños.



Figura 2.9. Soporte móvil

- Conector de celda de carga (figura 2.10). Este elemento se utilizó para conectar la celda de carga al extremo del contraviento. Para mantener la alineación de todo el dispositivo de carga durante la prueba se decidió darle una forma de émbolo como se muestra en la figura 2.10

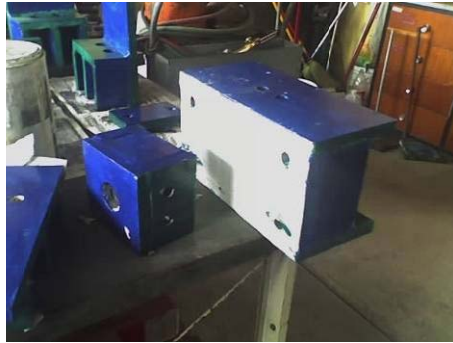


Figura 2.10. Conector de celda de carga existente

- Soporte del cilindro hidráulico. Para fijar el cilindro hidráulico al soporte móvil se utilizaron cuatro elementos: una placa rectangular con una perforación roscada, una placa con atiesadores y dos elementos de soporte laterales que se fijan al soporte móvil. En la figura 2.11 se muestra el despiece del soporte del cilindro hidráulico, mientras que en la figura 2.12 se muestra al cilindro ya conectado al soporte móvil.

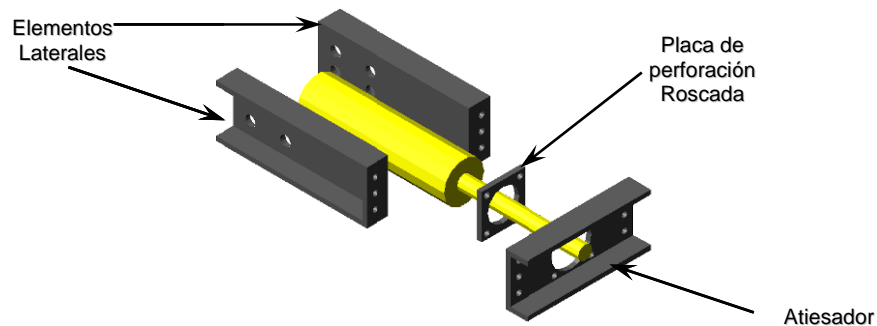


Figura 2.11. Soporte del cilindro hidráulico



Figura 2.12. Soporte del cilindro hidráulico

- Guía de control. Este componente se usó para mantener la alineación entre el cilindro, la celda de carga y el contraviento. La guía de control está construida con perfiles "I" y placas de acero A36 como se muestra en las figuras 2.13 y 2.14.

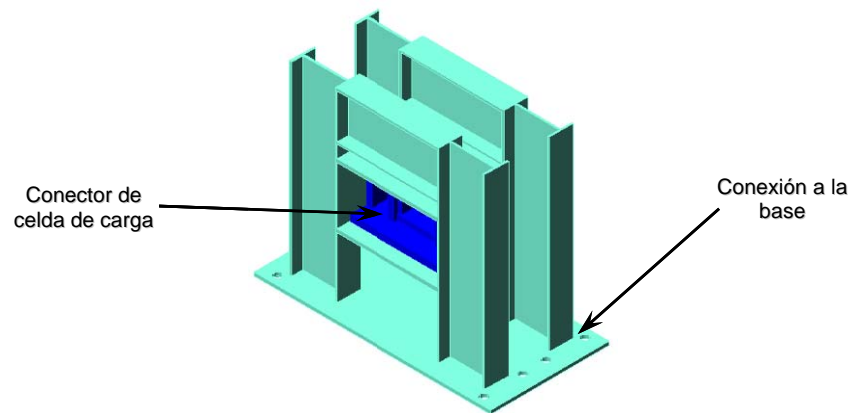


Figura 2.13. Guía de control



Figura 2.14. Guía de control

Soporte fijo. Este elemento tiene como función conectar el extremo del contraviento a la columna del marco de reacción. La transmisión de carga hacia la columna del marco de reacción se realiza mediante dos perfiles tipo canal espalda con espalda, añadiendo otro perfil en los patines para conectar la placa de conexión y los atiesadores. En la parte superior se colocaron cartabones para evitar deformaciones excesivas en el soporte. En las figuras 2.15 Y 2.16 se muestra el soporte fijo.

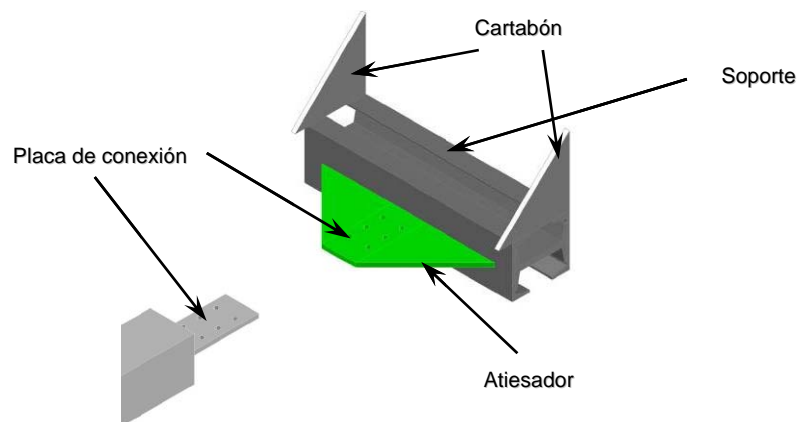


Figura 2.15. Soporte fijo



Figura 2.16. Soporte fijo

- Placas de protección. Estos elementos tienen como función proteger al personal de posibles movimientos imprevistos del contraviento durante los ensayos. En la figuras 2.17 y 2.18 se muestra un esquema de las placas de protección.

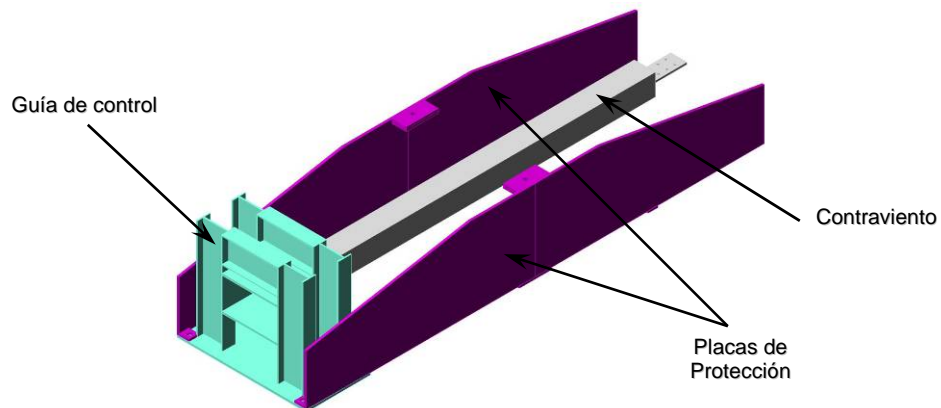


Figura 2.17. Placas de protección



Figura 2.18. Placas de protección

En las conexiones entre los extremos del contraviento y el soporte fijo y el conector de la celda de carga se utilizaron placas de acero A36 y tornillos A-325 de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. Además, a las placas en los extremos del contraviento se les colocaron cartabones en la parte inferior para rigidizarlas.

Más detalles del dispositivo de carga, tales como una bitácora fotográfica e información del procedimiento constructivo del dispositivo se pueden encontrar en Santos (2008). Finalmente, en la figura 2.19 se muestra un esquema del dispositivo de carga colocado en el marco de reacción.

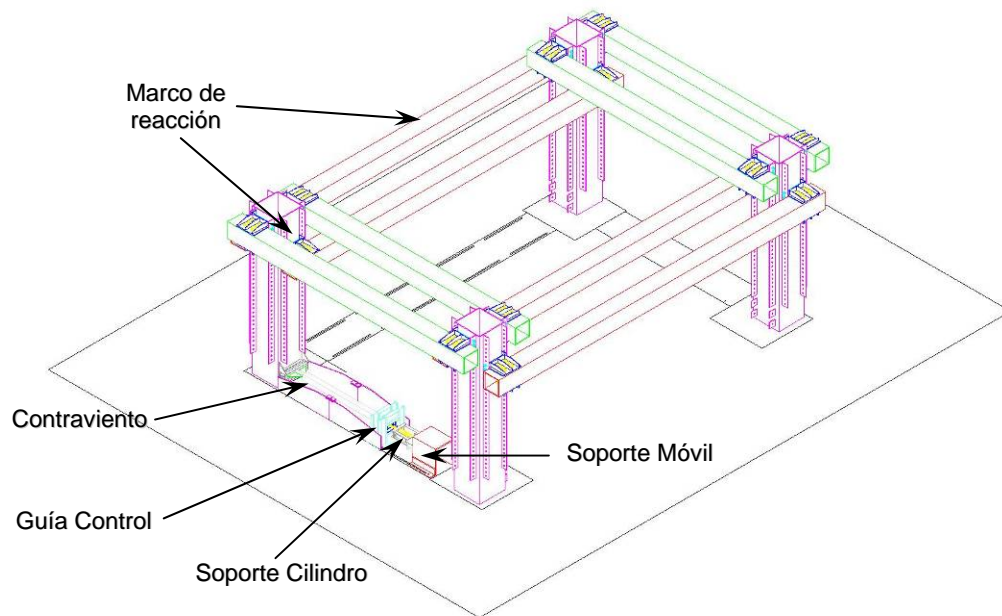


Figura 2.19. Dispositivo en marco de reacción

2.2 Prueba de carga del dispositivo

Para evaluar el comportamiento del dispositivo se realizaron pruebas colocando micrómetros electrónicos en distintas partes del dispositivo y en el contraviento. Se colocaron 2 micrómetros en los soportes del dispositivo como se muestra en las figuras 2.20 y 2.21 para registrar las deformaciones causadas por la aplicación de carga.



Figuras 2.20 y 2.21. Micrómetros en el dispositivo de carga

Para realizar el ensaye, se colocaron además dos micrómetros más como se muestra en la figura 2.22; uno de ellos registra la deformación del espécimen y el otro registra el movimiento del émbolo del cilindro hidráulico.



Figura 2.22. Micrómetros en el dispositivo de carga

Se encontró que el dispositivo se comportó satisfactoriamente; mas detalles de las pruebas de carga se reportan en Santos (2008).

Capítulo 3

Fabricación de los especímenes

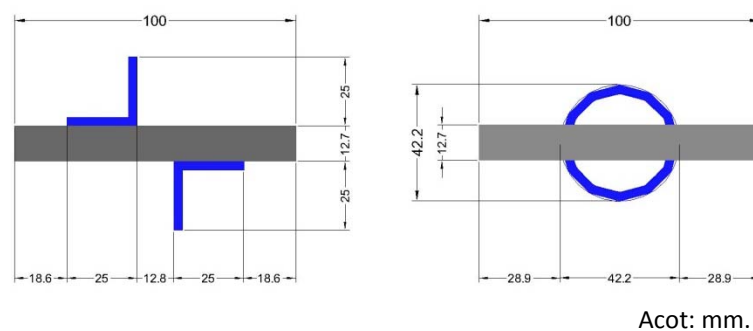
3.1 Materiales y propiedades geométricas

En el presente capítulo se presentan los detalles del procedimiento constructivo y del diseño de CVD estudiados.

En total se construyeron 14 especímenes. En las figuras 3.1 a 3.3 se muestran los arreglos utilizados en el presente estudio. Como se ha discutido en capítulos anteriores el CVD consta de 4 componentes: la camisa, el núcleo, el material confinante y el material antiadherente. Para los elementos estudiados se usaron perfiles tubulares rectangulares de acero laminado como camisa, ángulos y tubos de acero laminado como núcleo, mortero como material confinante; y como material antiadherente pintura, silicón y goma.

Los CVD estudiados tienen una longitud de 2 metros; esta longitud fue adoptada para simular un sistema de contravento tipo chevron en una crujía de 7 m x 4 m, aproximadamente, a escala 1: 2.5.

Como se mencionó, se consideraron 2 tipos de núcleo como se muestran en la figura 3.1.



Ángulos
Tubo
Figura 3.1 Arreglo interno de los contravientos en estudio

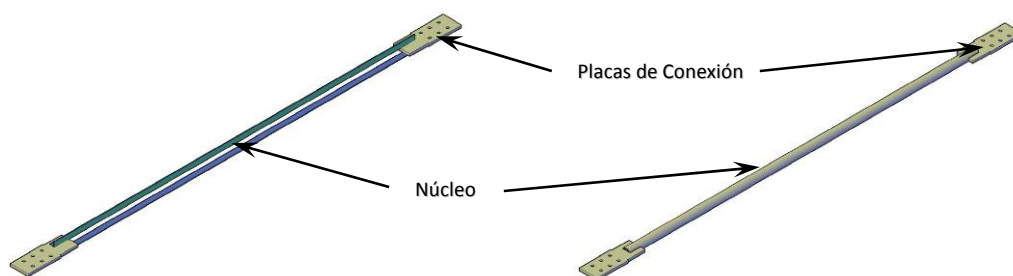


Figura 3.2 Arreglo interno de los contravientos en estudio

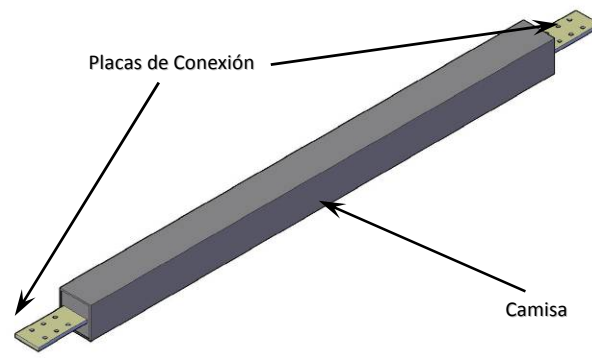
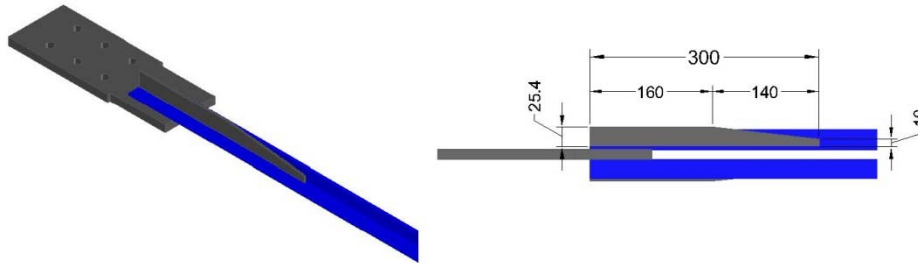


Figura 3.3 Arreglo de contravientos en estudio

Para el arreglo de ángulos durante los ensayos se observaron deformaciones excesivas debido a la concentración de esfuerzos en los extremos de los contravientos por el cambio de sección de los ángulos con la placa, por lo que se decidió reforzar dichos extremos con placa. En la figuras 3.4 y 3.5 se muestra un esquema del refuerzo del espécimen con las placas.



Acot: mm.

Figuras 3.4 y 3.5 Refuerzo en el extremo

En el diseño de la placa de refuerzo se propuso que el área de la zona extrema fuese entre 1.3 y 1.5 veces mayor que el área de los ángulos. Además, se redujo la sección en el centro en ambos ángulos al 90% de la sección de los ángulos.

Las áreas de los demás elementos del contraviento se calcularon con base en la capacidad del dispositivo de carga. En la tabla 3.1 se muestran las propiedades geométricas de ambos núcleos, así como su relación de esbeltez.

Tabla 3.1 Propiedades geométricas de la sección de contravientos

Espécimen	Núcleo	Refuerzo extremo	Área (cm ²)	I_{Prin} (cm ⁴)	r_{min} (cm)	KL/r (max)
1	Tubo circular	No	4.32	8.197	1.377	145.19
2	Tubo circular	No	4.32	8.197	1.377	145.19
3	Tubo circular	No	4.32	8.197	1.377	145.19
4	Tubo circular	No	4.32	8.197	1.377	145.19
5	Ángulos	No	3.024	3.54	1.082	184.85
6	Ángulos	No	3.024	3.54	1.082	184.85
7	Ángulos	Si	3.024	3.54	1.082	184.85

8	Tubo circular	No	5.16	12.925	1.583	126.37
9	Ángulos	Si	3.024	3.54	1.082	184.85
10	Tubo circular	No	5.16	12.925	1.583	126.37
11	Tubo circular	No	5.16	12.925	1.583	126.37
12	Tubo circular	No	5.16	12.925	1.583	126.37
13	Tubo circular	No	5.16	12.925	1.583	126.37
14	Ángulos	Si	2.878	1.976	0.829	120.68

En la tabla 3.1 los momentos de inercia (I), radio de giro (r) y relación de esbeltez son respecto a los ejes principales de inercia. Cabe hacer notar que los valores del momento de inercia y del radio de giro son iguales para ambos ejes para el caso del arreglo de ángulos; esto contribuyó a que se eligieran las configuraciones utilizadas.

En las siguientes expresiones, se muestran los requisitos de la sección 6.2.3.2 de las NTC-EM (2004) para la relación de esbeltez máxima en contravientos que forman parte de estructuras con alta ductilidad.

Para el arreglo de ángulos y el arreglo de tubo de la segunda etapa:

$$E = 5.88 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 5.88 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2}{3636.83 \text{ kg/cm}^2}} = 141.295$$

Para el arreglo de tubos de la primera etapa, dado que el esfuerzo de fluencia del acero fue diferente:

$$E = 5.88 \sqrt{\frac{2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2}{4610.36 \text{ kg/cm}^2}} = 125.50$$

Note que la mayoría de los CVD's ensayados no cumplen con los requisitos de esbeltez marcadas en las NTC-EM; sin embargo, dichos requisitos fueron establecidos para contravientos tradicionales, los cuales son susceptibles a pandeo. Por lo tanto, este requisito es no necesariamente aplicable a CVD's ya que, como se mostrará en los resultados de los ensayos que se presentan más adelante, los CVD's mostraron un comportamiento histerético estable.

La determinación de la relación de esbeltez máxima para CVD's requiere de estudios experimentales adicionales para validar las expresiones que se propongan.

Conforme a las recomendaciones existentes para el diseño de contravientos restringido contra pandeo, la camisa se dimensionó de tal forma que su carga de pandeo elástico sea por lo menos igual a 1.5 veces la carga de pandeo elástico del núcleo (Uang 2003). Bajo esta consideración, el perfil utilizado como camisa fue *un perfil tubular rectangular (PTR) de 4x4x1/8 pulgadas*.

Aun cuando inicialmente se tenía planeado usar acero A36 para ambos arreglos de núcleo, sólo el arreglo de doble ángulo se fabricó con dicho acero. Por motivos de disponibilidad de materiales, para el núcleo tubular se utilizó acero de grado A-572 G50.

Cabe mencionar que el proveedor del tubo de acero aseguró que el material del tubo era acero A36; sin embargo, ensayos de probetas la en máquina universal mostraron que el tubo no era de acero A36.

En las figuras 3.6 a 3.8, se muestran curvas esfuerzo deformación unitaria para el acero utilizado en los núcleos de doble ángulo y para el acero del tubo.

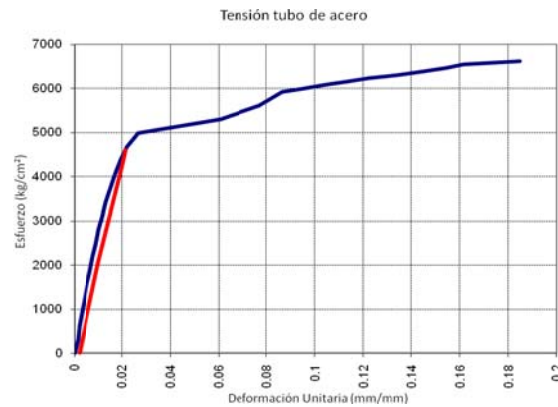


Fig. 3.6 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria del acero utilizado en el arreglo de tubos de la primera etapa

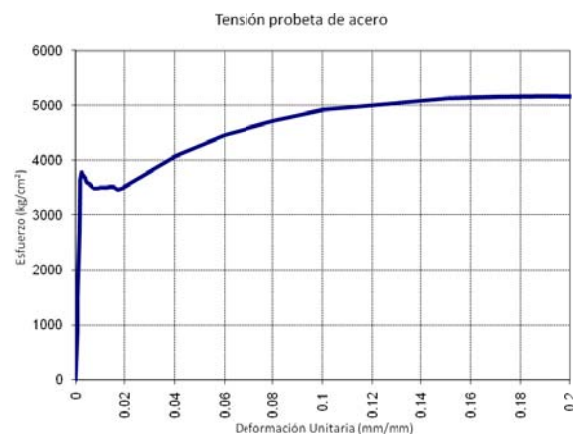


Fig. 3.7 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria del acero utilizado el arreglo de ángulos

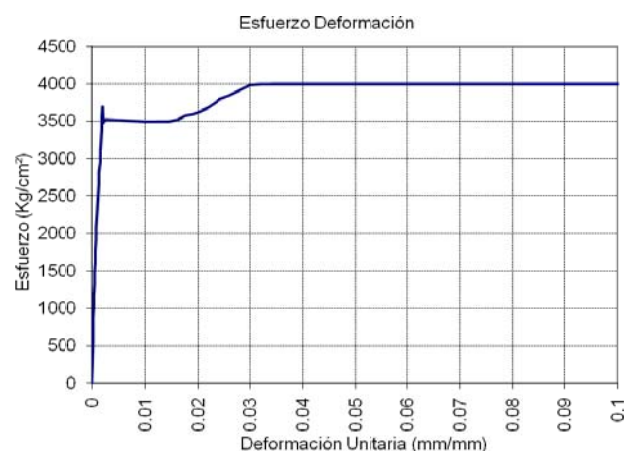


Fig. 3.8 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria del acero utilizado en el arreglo de tubo de la segunda etapa



Figs. 3.9 y 3.10 Prueba de tensión del tubo utilizado en la segunda etapa

En cuanto al material anti-adherente, se consideraron las combinaciones que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Diferentes combinaciones de núcleos y materiales antiadherentes

Espécimen	Núcleo	Tipo de Acero	Recubrimiento	Antiadherente
1	Tubo circular	A-572 G-50	Goma	Pintura y grasa
2	Tubo circular	A-572 G-50	Goma	Pintura y grasa
3	Tubo circular	A-572 G-50	Silicón	Pintura y grasa
4	Tubo circular	A-572 G-50	Silicón	Grasa
5	Ángulos	A-36	Cinta de aislar	Pintura y grasa
6	Ángulos	A-36	Cinta de aislar	Pintura y grasa
7	Ángulos	A-36	Silicón	Pintura y grasa
8	Tubo circular	A-572 G-50	Silicón	Pintura y grasa
9	Ángulos	A-36	Silicón	Pintura y grasa
10	Tubo circular	A-572 G-50	Silicón	Pintura y grasa
11	Tubo circular	A-572 G-50	Goma	Pintura y grasa
12	Tubo circular	A-572 G-50	Goma	Pintura y grasa
13	Tubo circular	A-572 G-50	Goma	Pintura y grasa
14	Ángulos	A-36	Silicón	Pintura y grasa

Finalmente, en todos los especímenes se utilizó como material confinante mortero tipo I, de acuerdo a las NTC-M (2004), con una resistencia promedio de 232 kg/cm².

3.2 Instrumentación

Con la finalidad de conocer el comportamiento del elemento a nivel local y global, los modelos fueron instrumentados internamente con deformímetros eléctricos (Strain Gages) y externamente mediante transductores de desplazamiento (micrómetros). En las figuras 3.11 y 3.12, se muestra la posición de los deformímetros colocados en cada espécimen construido.

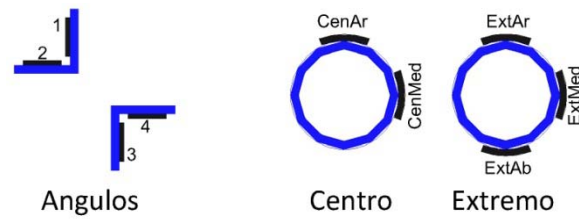


Figura 3.11 Colocación de deformímetros eléctricos (Strain Gages)

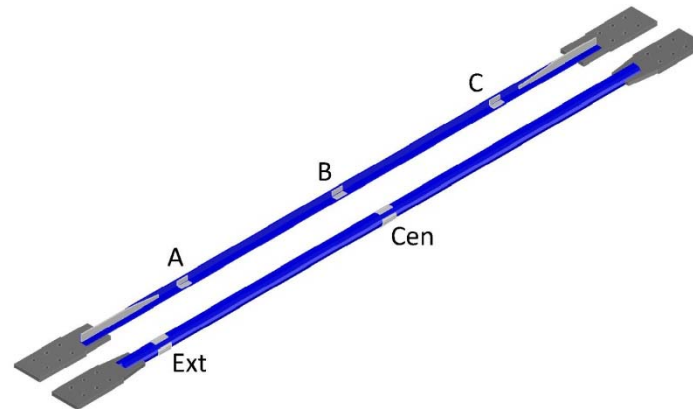


Figura 3.12 Colocación de deformímetros eléctricos (Strain Gages)

En la figura 3.13 Se muestra un esquema de la instrumentación externa utilizada en los ensayos. El detalle del funcionamiento de los micrómetros externos, se explica en Santos (2007).



Figura 3.13 Colocación de micrómetros externos

Capítulo 4

4.1 Ensaye de especímenes

Los modelos fabricados se sometieron a series de ensayos de carga cíclica reversible. Los ensayos se controlaron por desplazamiento y se utilizaron 2 patrones.

El primer patrón de desplazamiento se muestra en la figura 4.1 y fue planteado para sujetar al núcleo a incrementos de deformación iguales a la mitad del desplazamiento de fluencia. Este patrón de desplazamientos tuvo como objetivo evaluar el comportamiento del dispositivo de carga así como de estudiar en detalle el nivel de desadherencia producido por los diferentes arreglos usados y comportamiento de los diferentes núcleos considerados. Los especímenes 1 al 6 fueron sometidos a dicho patrón de carga.

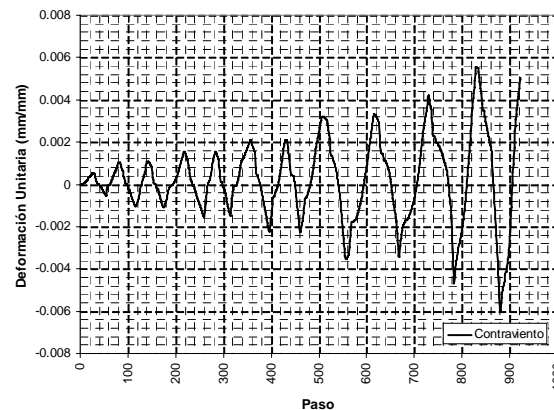


Figura 4.1. Patrón de desplazamientos para los especímenes 1 a 6

El segundo patrón de desplazamientos fue el recomendado para CVD's conforme a Uang y Nakashima (2003) y Sabelli (2001). La historia de desplazamientos se presenta en la tabla 4.1. En dicha tabla μ es la ductilidad de desplazamiento a la que es sometido el espécimen; esta historia de desplazamientos supone que durante la demanda de distorsión máxima en la estructura el contraviento estará sometido a una demanda de ductilidad de desplazamiento igual a 5.

Tabla 4.1. Segunda historia de desplazamientos de los CVD

6 ciclos	$\mu = 1$
4 ciclos	$\mu = 2.5$
4 ciclos	$\mu = 5$
2 ciclos	$\mu = 7.5$
Ciclos restantes hasta completar una ductilidad acumulada de 140	$\mu = 5$

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestran gráficas de la historia de desplazamientos utilizada para cada uno de los contravientos; esto es, se calculó su propia grafica

dependiendo del esfuerzo de fluencia de cada acero y la longitud de cada uno de ellos. Los especímenes 7 al 12 y 14 fueron sometidos a dicho patrón de desplazamientos.

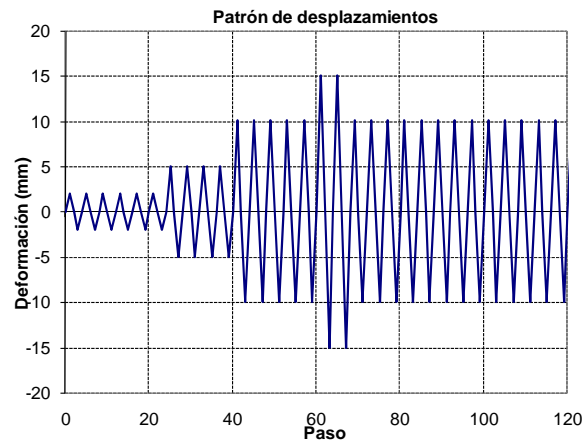


Figura 4.2. Patrón de desplazamientos para los especímenes 7, 9 y 14

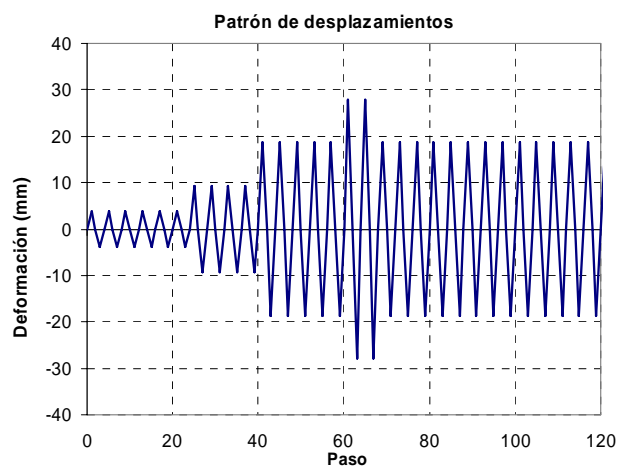


Figura 4.3. Patrón de desplazamientos para los especímenes 8, 10, 11 y 12

4.2 Resultados

- Resultados espécimen 1

En el espécimen 1 se utilizó el protocolo de carga que se muestra en la figura 4.1, pero se tuvieron problemas con el sistema de carga por lo que el ensaye del elemento tuvo que ser detenido; por lo tanto no se alcanzaron los niveles de fluencia esperados. Sin embargo; hasta antes de que se detuviera la prueba el CVD mostró un buen comportamiento en cuanto a desadherencia.

Para los ensayos siguientes, se hicieron soldaduras adicionales en el sistema de carga para evitar el deslizamiento de los apoyos durante las pruebas.

En la figura 4.4 se muestran las gráficas de los datos obtenidos en el ensaye del espécimen 1. Estos resultados se muestran solo para documentar el ensaye, pues no se incluyeron en los cálculos presentados en el capítulo siguiente. (Para la localización de los deformímetros y del micrómetro, ver las figuras 3.11 y 3.12 para los deformímetros y 3.13 para el micrómetro del contraviento)

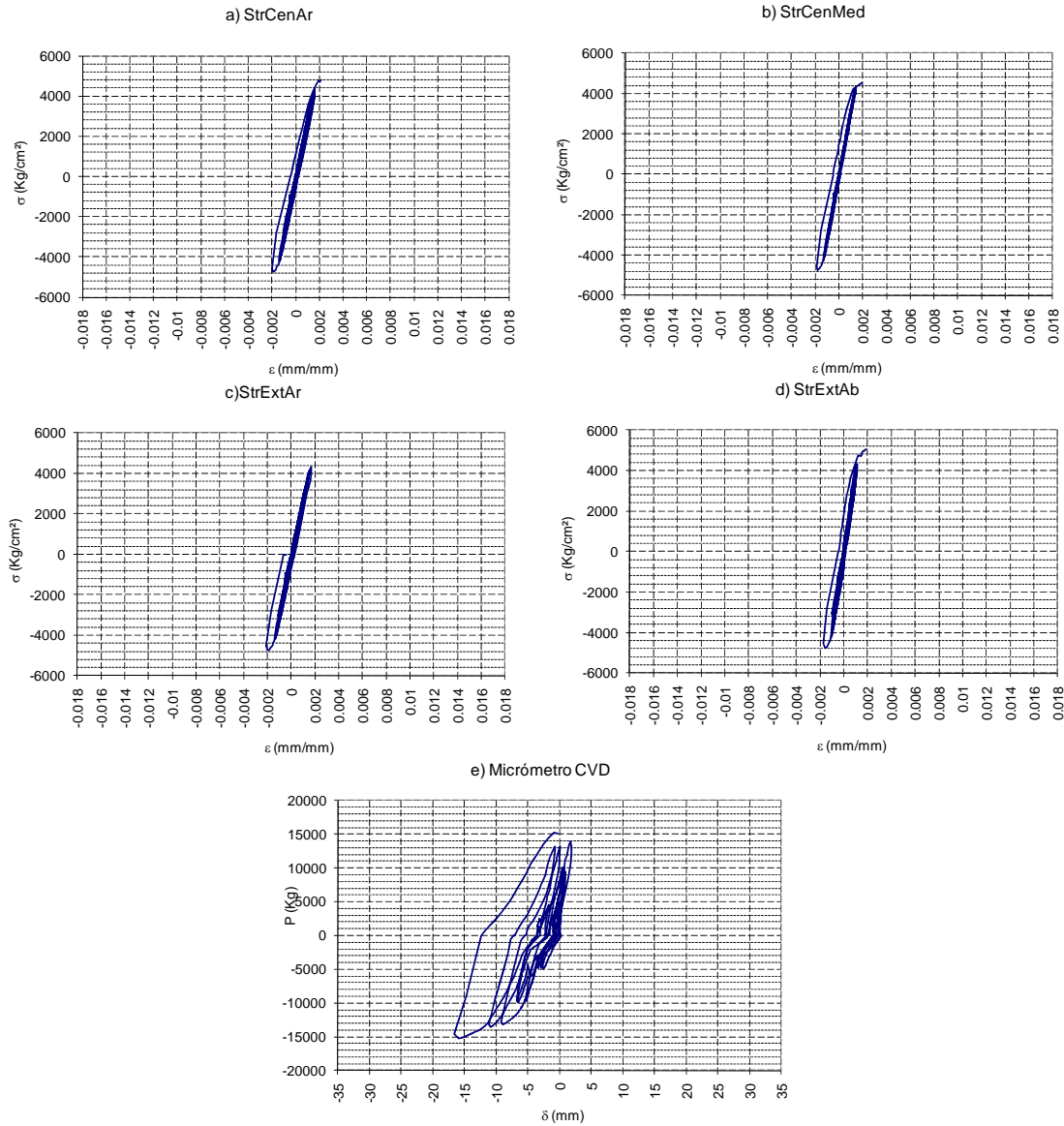


Figura 4.4. Diagramas de histéresis del espécimen 1

Las lecturas del micrómetro muestran claramente que existió deslizamiento que se presentó en los tornillos y, especialmente, en el dispositivo de medición. Se observa que es mayor la fuerza desarrollada a compresión que a tensión; sin embargo, en las figuras 4.5 y 4.6 se muestra como el núcleo se deslizó de la camisa y el material confinante, por lo que las diferencias en las cargas de tensión y compresión se deben al mal comportamiento del sistema de carga.



Figura 4.5 y 4.6. Ensayo del espécimen 1

- Resultados espécimen 2

En el espécimen 2 se utilizó el protocolo de carga que se muestra en la figura 4.1. A diferencia del anterior, si se pudo llevar al espécimen a la falla. Se observa un comportamiento estable del ciclo de histéresis y una resistencia a tensión y compresión similar, lo que indica que existió desadherencia del núcleo respecto a la camisa y al mortero. Los resultados claramente sugieren que los problemas presentados con el dispositivo de carga fueron corregidos satisfactoriamente. En la figura 4.7, se muestran las gráficas de los datos obtenidos en el ensayo del espécimen.

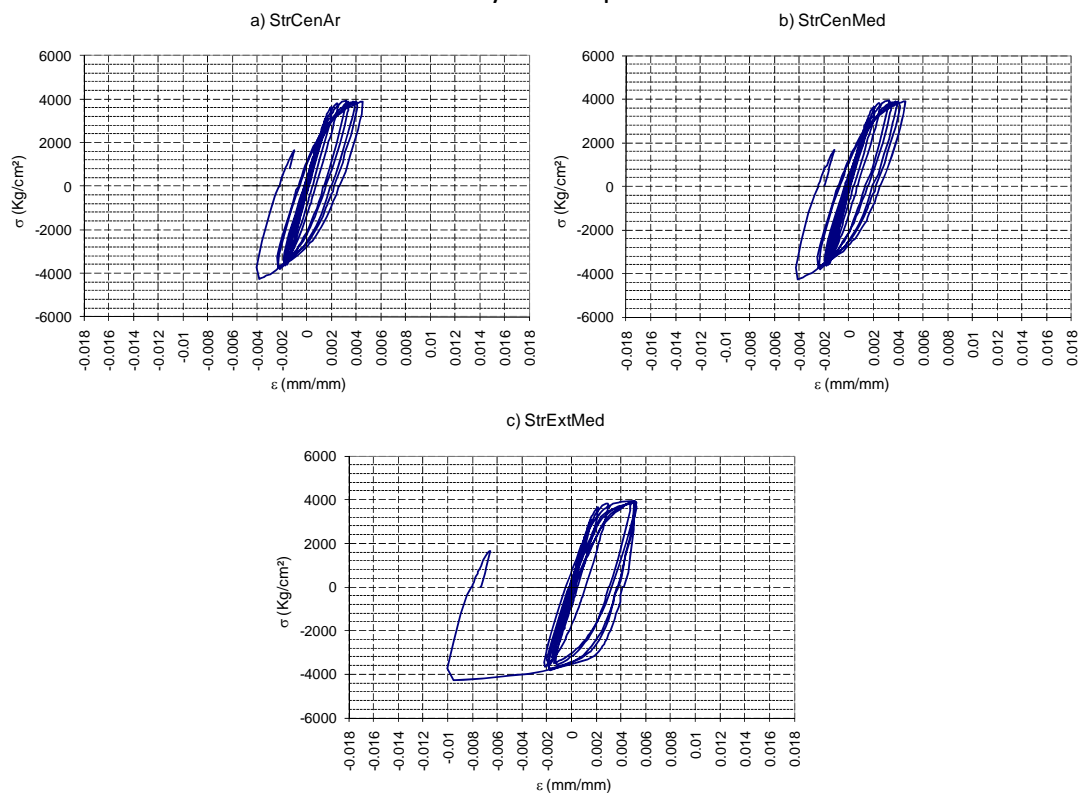


Figura 4.7. Diagramas de histéresis del espécimen 2

Sólo se presentan los resultados de la instrumentación interna debido a que se tuvieron problemas con el micrómetro y las lecturas no fueron confiables. Sin embargo, se

observó una ductilidad local cercana a 2.1 en la zona central del CVD y de 6 en el extremo del mismo.

El mecanismo de falla fue la fractura del núcleo en la zona cercana a la placa de conexión, debido a la concentración de esfuerzos en dicha zona y a la posible mala calidad de la soldadura en la conexión.

- Resultados espécimen 3

Para este espécimen, se utilizó el protocolo de carga que se muestra en la figura 4.1. Se observa un comportamiento estable del ciclo de histéresis y una resistencia similar a compresión y a tensión, lo que indica un buen comportamiento del material antiadherente. En la figura 4.7 se muestran las gráficas de los datos obtenidos en el ensaye del espécimen donde se observa un salto en la ductilidad de 1 a una cercana a 4 en el centro y de 5 en el extremo.

También se observa que la prueba tuvo que ser detenida en compresión debido a que la camisa topó con la placa de conexión del soporte fijo, ya que el núcleo fluyó demasiado y no permitió continuar deformando el CVD. Por ello se decidió parar la prueba aunque los datos obtenidos estaban dando resultados muy satisfactorios.

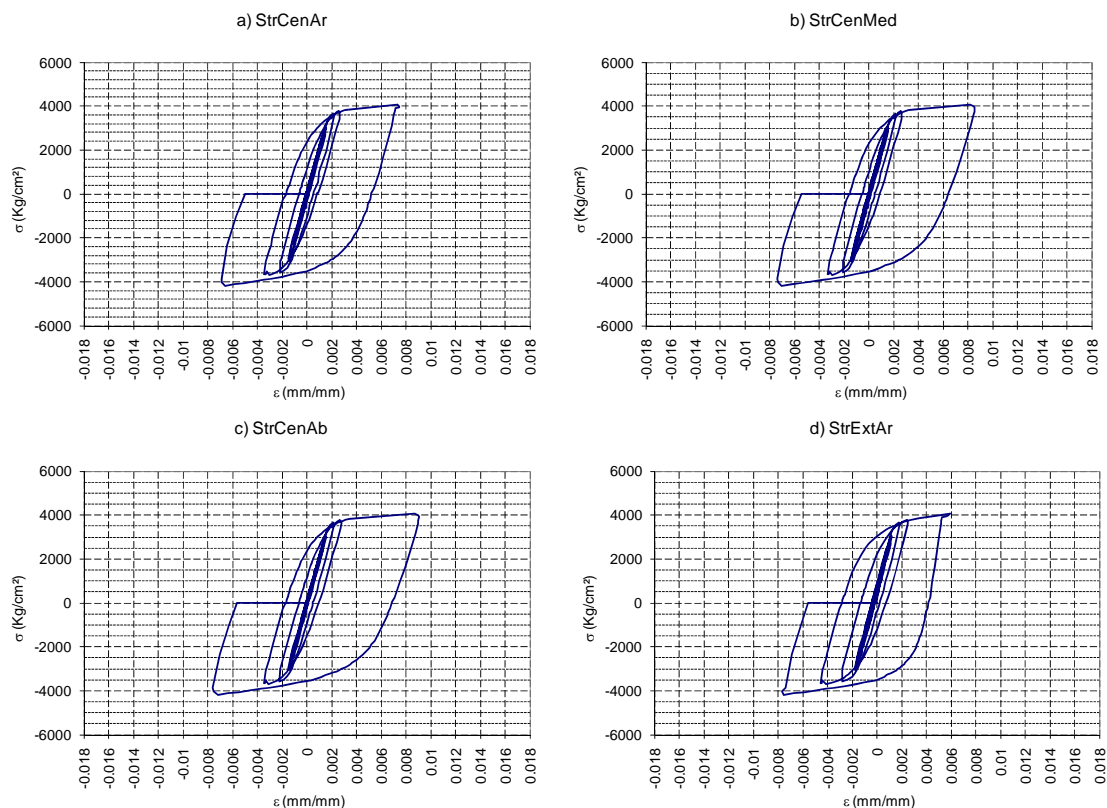


Figura 4.8. Diagramas de histéresis del espécimen 3

- Resultados espécimen 4

En el espécimen 4 utilizó se el protocolo de carga que se muestra en la figura 4.1. Se observa un comportamiento estable del ciclo de histéresis y buen funcionamiento del material antiadherente. Se observaron ductilidades cercanas a 2, tanto a nivel local como a nivel global.

En la figura 4.9, se muestran las gráficas de los datos obtenidos en el ensaye del espécimen. Cabe hacer mención de la gráfica del micrómetro del contraviento respecto a la carga, donde se muestran pequeños saltos, debidos al deslizamiento de los tornillos y al mecanismo de sujeción del micrómetro; pero, en términos generales, se nota que tienen buen funcionamiento.

El mecanismo de falla fue la fractura del núcleo en la zona cercana a la placa de conexión.

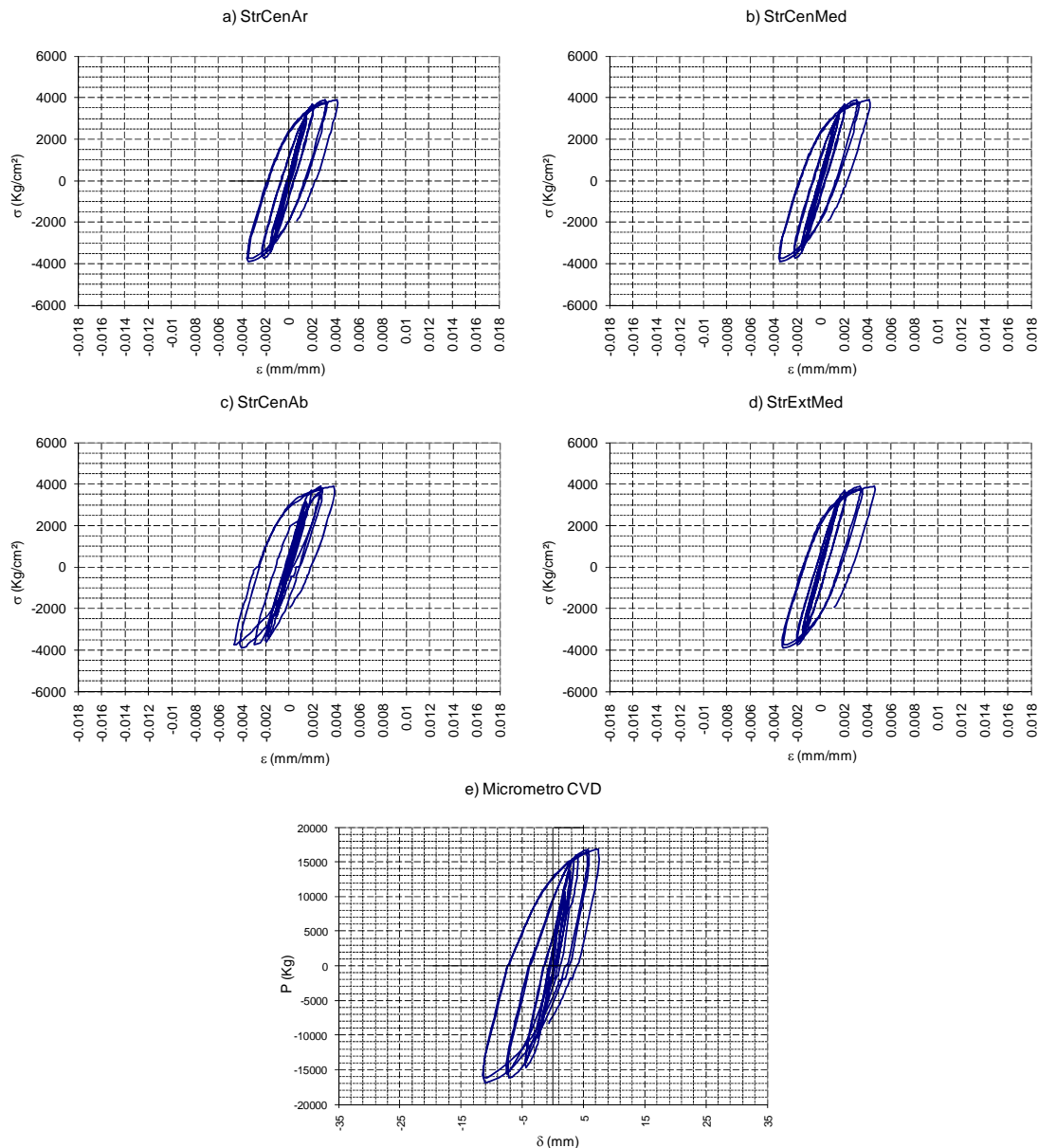


Figura 4.9. Diagramas de histéresis del espécimen 4.

- Resultados espécimen 5

Se utilizó el protocolo de carga mostrado en la figura 4.1.

Hasta donde se pueden observar los resultados, se nota un comportamiento estable en cuanto a desadherencia, por lo que se puede pensar que, al igual que los especímenes anteriores que estaban contruidos con el arreglo de tubo, el arreglo de ángulos puede funcionar adecuadamente.

En la figura 4.10, se muestran gráficas de los datos obtenidos en el ensaye del espécimen. Claramente se observa que el espécimen no fue capaz de desarrollar un comportamiento inelástico, debido a una fractura en el núcleo cerca de la placa de conexión. Se piensa que esta falla fue debida a la fragilización del material ocasionada por el proceso de soldadura.

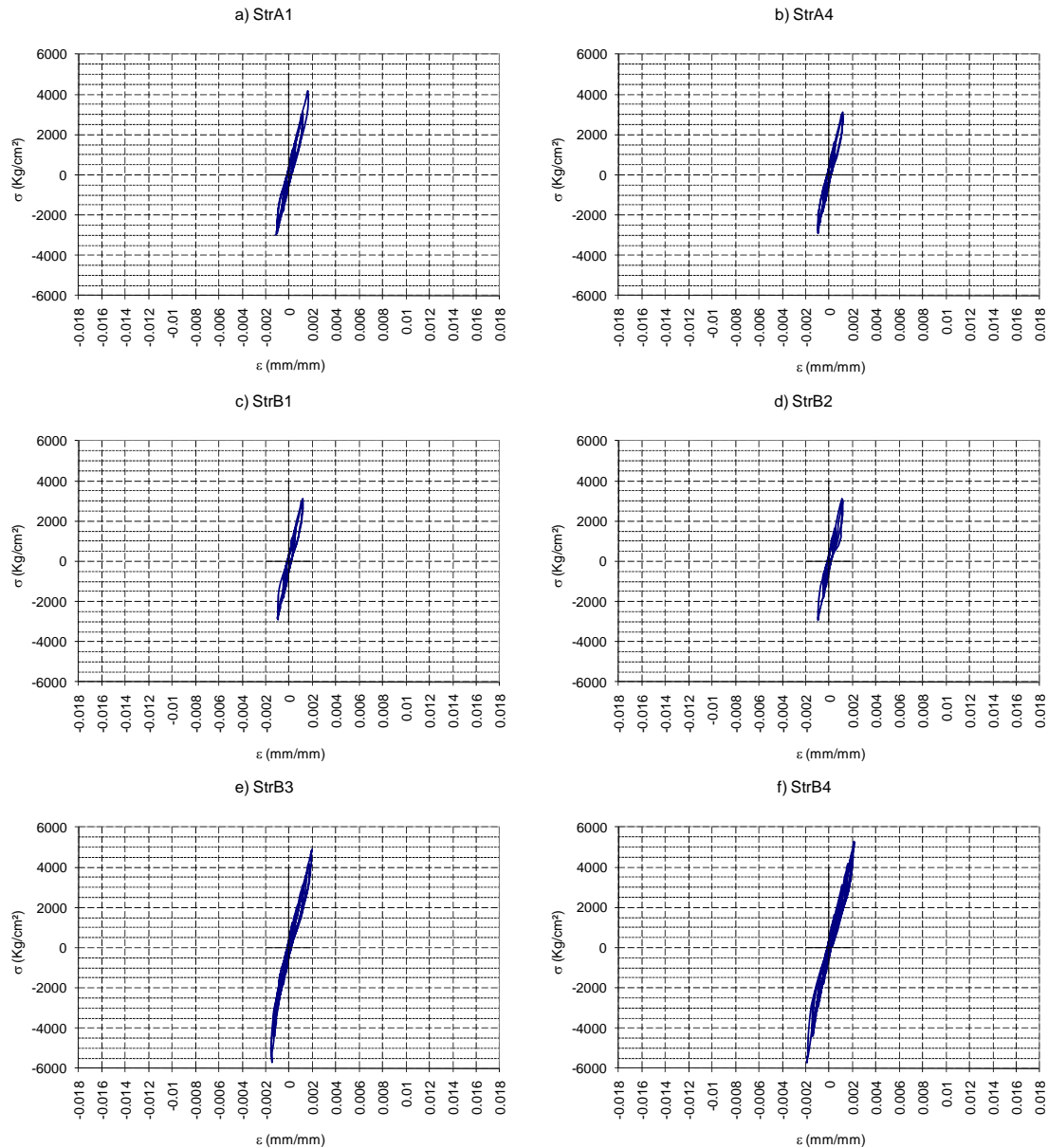


Figura 4.10. Diagramas de histéresis del espécimen 5

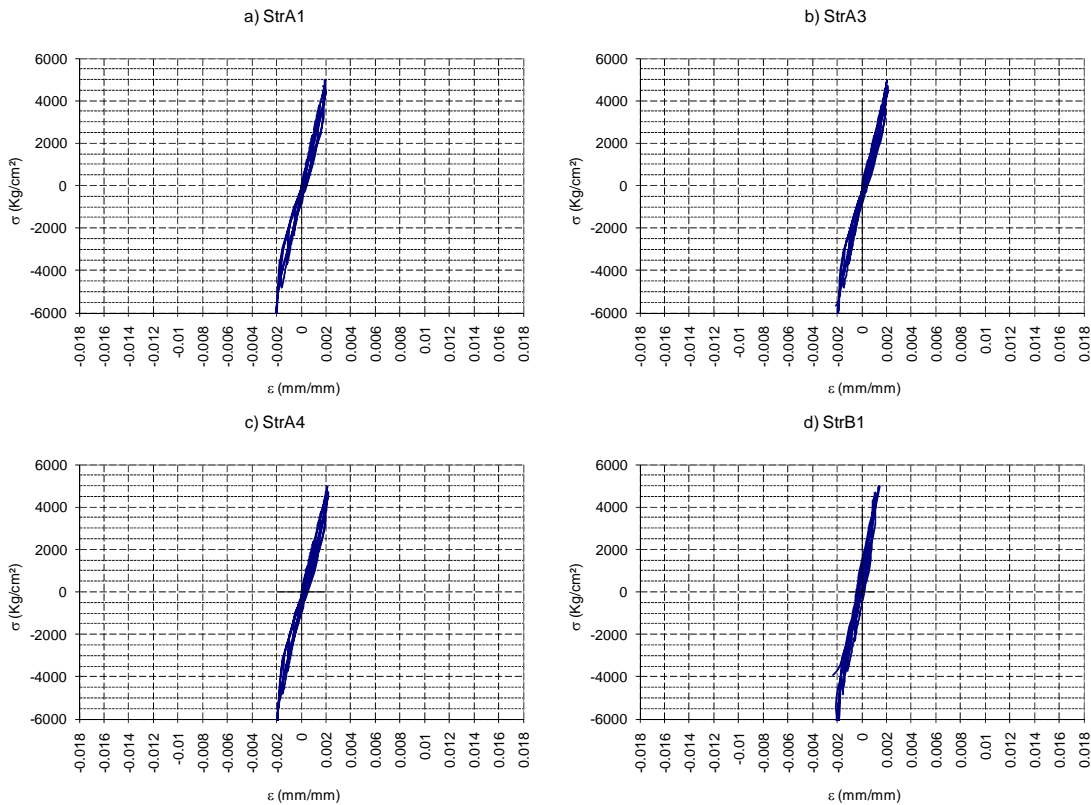
Con lo anterior, se puede decir que el CVD tuvo un mal comportamiento, por lo que no se considerarán sus resultados en el capítulo siguiente.

- Resultados espécimen 6

En este espécimen se utilizó por última ocasión, el protocolo de carga que se muestra en la figura 4.1. En este ensayo la instrumentación no recopiló datos correctamente, ya que se observó un comportamiento inelástico importante, como se observa en la figura 4.12 y las lecturas registradas no son consistentes con el nivel de deformación observado.

No se pudo llevar a la falla al espécimen debido a que la camisa topó con la placa de conexión del apoyo fijo, como se muestra en la figura 4.12 y 4.13.

Como en el caso anterior, no se considerarán estos datos en el análisis de resultados del capítulo siguiente, pero se muestran las gráficas de dicha prueba en la figura 4.11.



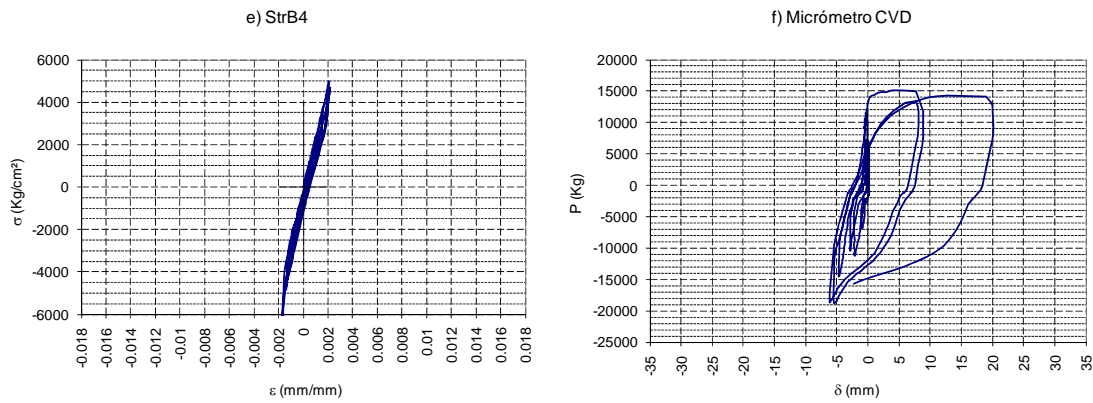


Figura 4.11. Diagramas de histéresis del espécimen 6

En las figuras 4.12 y 4.13, se muestra como el núcleo desliza, aún cuando se puede observar un desconchamiento del mortero que confina al núcleo en los extremos del CVD, se muestra, además el choque de la camisa con la placa de conexión del apoyo fijo.



Figura 4.12 y 4.13. Ensayo del espécimen 6

- Resultados espécimen 7

Para el espécimen 7 se utilizó el protocolo de carga mostrado en la figura 2, que corresponde al patrón recomendado para CVD's (Uang y Nakashima 2003).

En la figura 4.14 se puede observar que el comportamiento del espécimen, con refuerzo en el extremo, fue adecuado, como lo muestra la amplitud del ciclo histerético. En la figura 4.14 e) se muestra el ciclo histerético, pero ahora representado con el micrómetro de medición de desplazamiento. Se puede constatar que el dispositivo funciona satisfactoriamente hasta ductilidades locales de 6, con respecto a los desplazamientos de fluencia en el extremo y de 5 en el centro, y de 4 a nivel global. El ensayo terminó por una fractura de la soldadura en el extremo del CVD, pero ahora a ductilidades altas en comparación con los especímenes anteriores.

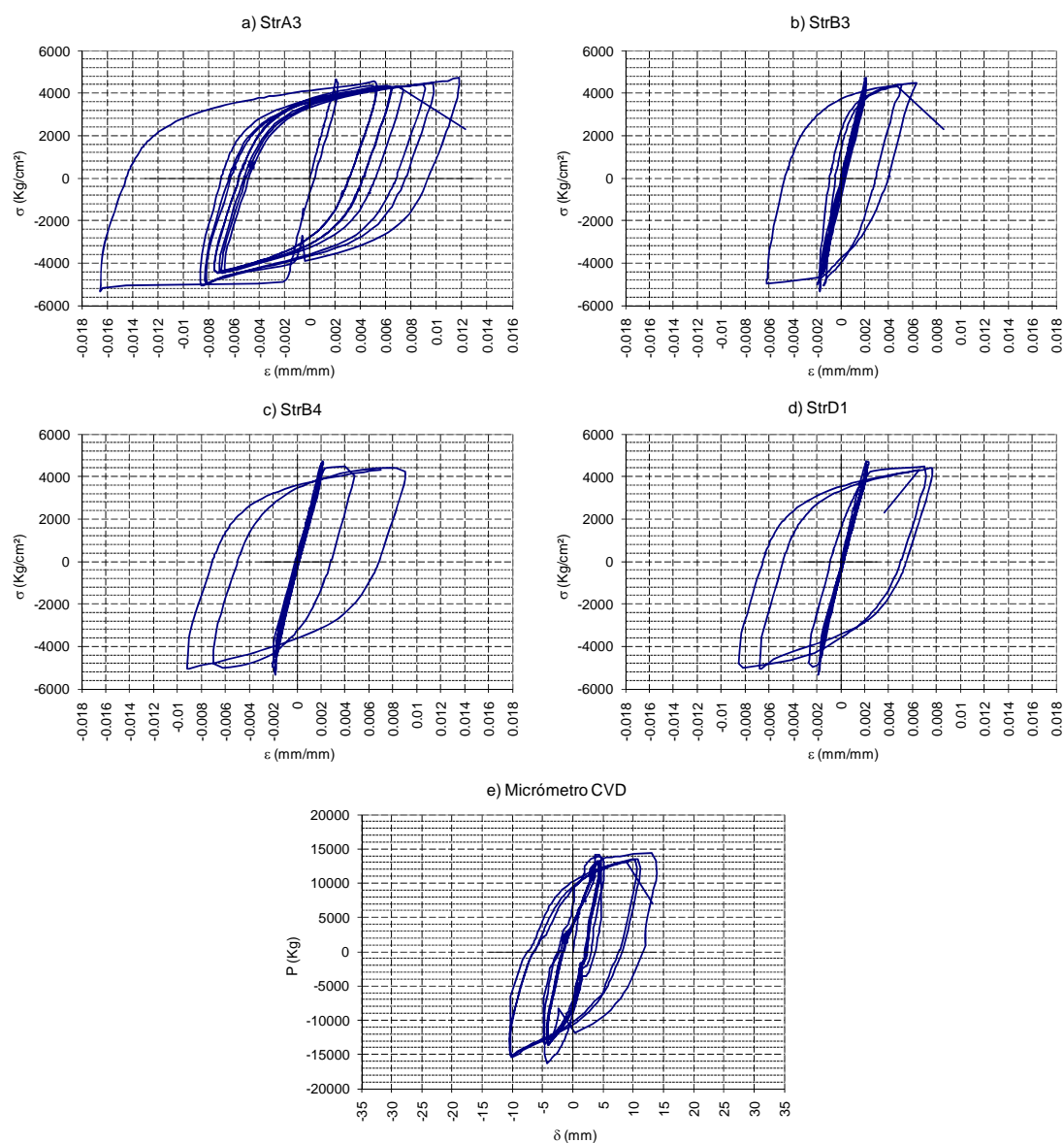


Figura 4.14. Diagrama de histéresis del espécimen 7

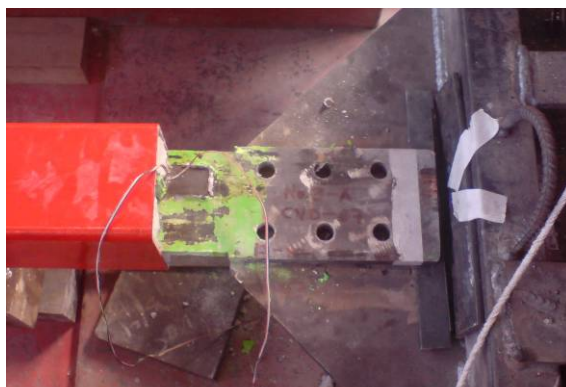


Figura 4.15. Ensayo del espécimen 7

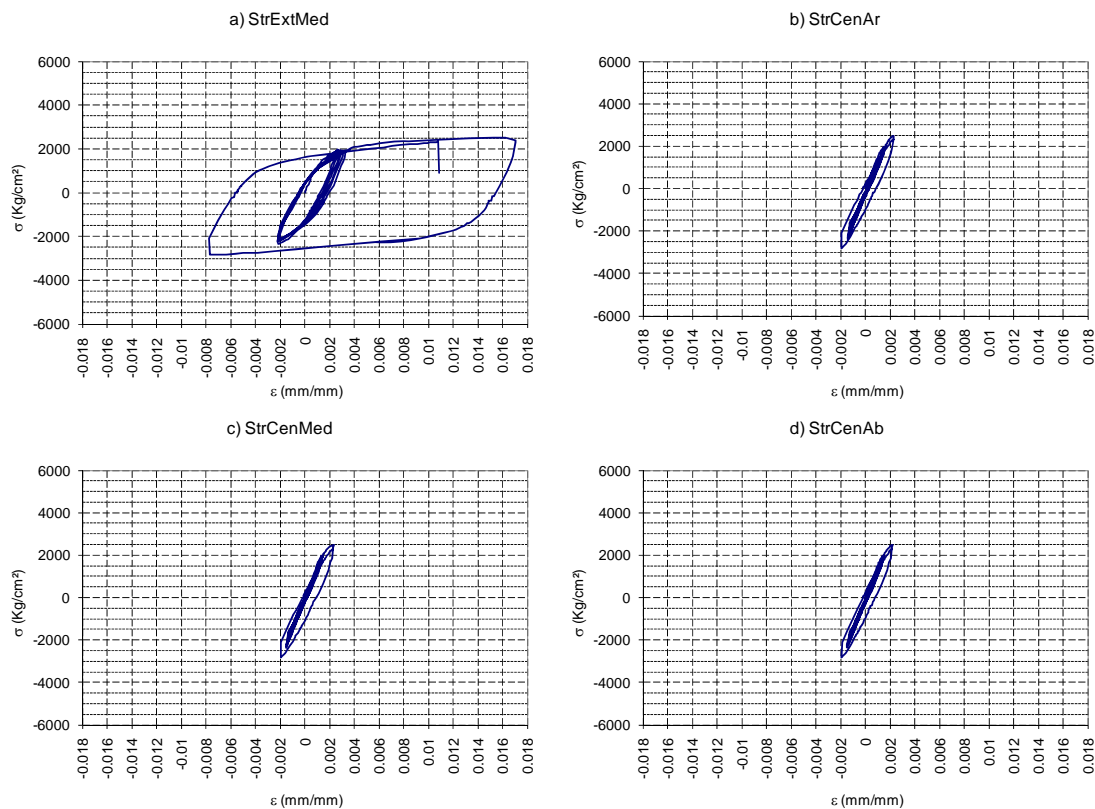
En la figura 4.15, se muestra la imagen del ensaye del espécimen 7, donde se aprecia la falla en la soldadura en el extremo; también hay evidencia de desadherencia del núcleo respecto a la camisa, lo que demuestra que el refuerzo en el extremo y el material antiadherente funcionaron adecuadamente, por lo que los siguientes especímenes con el arreglo de ángulos se construyeron de la misma manera.

- Resultados espécimen 8

En el espécimen 8 se utilizó el protocolo de carga mostrado en la figura 3, el cuál es típico para CVD's.

En la figura 4.16 se puede observar el comportamiento del espécimen en los distintos puntos instrumentados; donde se observa la concentración de esfuerzos en el extremo en que se produjo la falla de la soldadura que se muestra en las figuras 4.17 y 4.18.

Se observa que el espécimen llegó a la fluencia, pero en el extremo fluyó con ductilidades cercanas a 6, lo que provocó la fractura de la soldadura. La prueba muestra que el dispositivo de carga funciona adecuadamente, por lo que en las pruebas posteriores se pretende alcanzar los niveles de fluencia esperadas según el protocolo de carga.



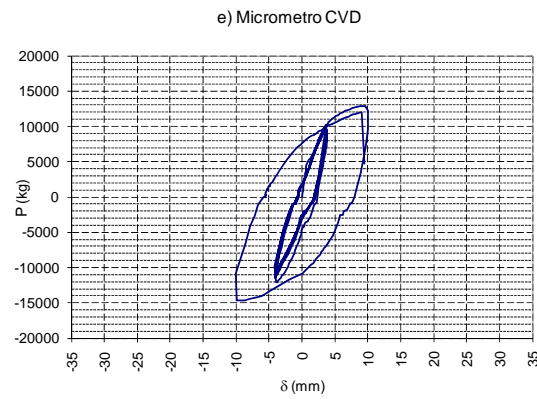


Figura 4.16. Diagrama de histéresis del espécimen 8



Figura 4.17 y 4.18. Ensayo del espécimen 8

- Resultados espécimen 9

El espécimen 9 se construyó con el arreglo de ángulos reforzado en el extremo y se utilizó el patrón de carga mostrado en la figura 4.2. Desgraciadamente, los materiales utilizados para la instrumentación del espécimen no se comportaron como se esperaba. En la figura 4.19 solamente se presenta la gráfica carga contra desplazamiento, donde se puede observar un comportamiento del ciclo histerético muy estable, logrando alcanzar ductilidades muy altas cercanas a 7. Pero los deformímetros no registraron datos confiables para procesar, por lo que para el análisis de resultados se trabajará con los desplazamientos obtenidos con el micrómetro con el que se controló la prueba.

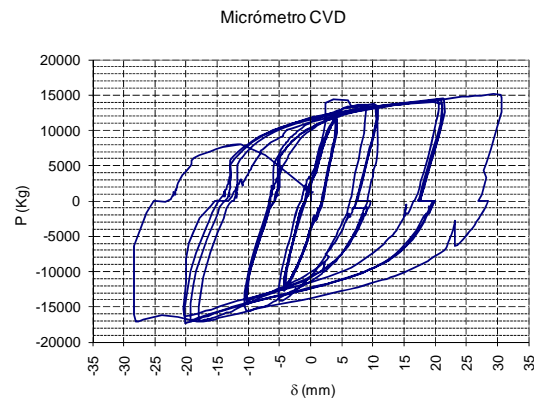


Figura 4.19. Diagrama de histéresis del espécimen 9

Como el ciclo mostrado en la figura 4.19 del espécimen 9 es muy regular a pesar de los saltos de la línea debidos al deslizamiento de los tornillos, se hizo un estudio profundo del comportamiento interno del espécimen. En las figuras 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23 se observa como los ángulos presentaron un modo de pandeo superior en el centro del núcleo.



Figuras 4.20 y 4.21. Núcleo del espécimen 9



Figuras 4.22 y 4.23. Núcleo del espécimen 9

- Resultados espécimen 10

En el espécimen 10 se utilizó el protocolo de carga mostrado en la figura 3.

En la figura 4.24, se puede observar el comportamiento del espécimen en el centro y el micrómetro con el que se controló la prueba.

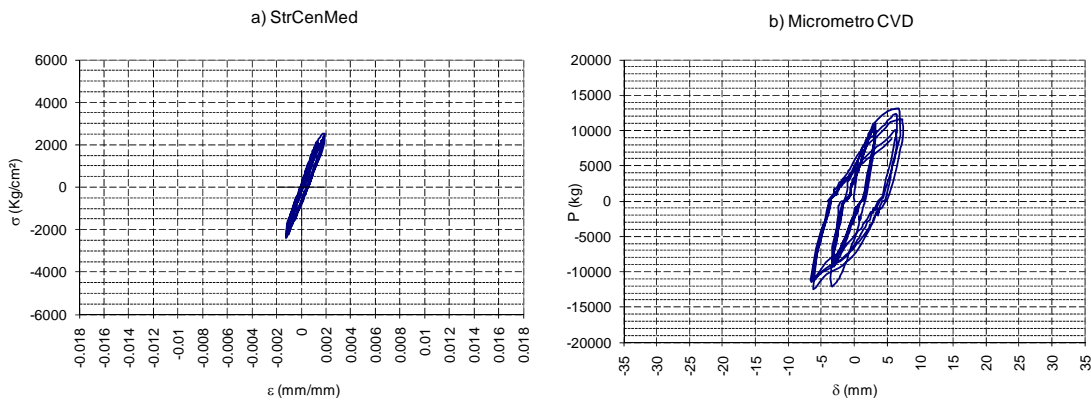


Figura 4.24. Diagrama de histéresis del espécimen 10.

La falla se presentó en el núcleo, en el extremo del CVD cerca de la placa de conexión, exhibiendo una ductilidad global de 2.5, aunque en el centro se observa que solamente llegó a una deformación unitaria de fluencia.

- Resultados espécimen 11

Para el espécimen 11 desafortunadamente no se obtuvieron lecturas confiables, por lo que no se presentan sus diagramas obtenidos ni se analizarán los resultados para el capítulo 5.

- Resultados espécimen 12

El espécimen 12 se construyó con tubo de 1 ½" de diámetro por lo que se utilizó el protocolo de carga que se muestra en la figura 4.

Se observa en las gráficas de la figura 4.25 que en el centro del espécimen no desarrolló la fluencia que se esperaba y que en el extremo fluyó ampliamente, especialmente cuando estuvo sometido a compresión, llegando a ductilidades locales de 5 y globales de 3; esto se pudo presentar debido al choque de la camisa con el apoyo.

El espécimen no se llevó a la falla ya que la camisa topó con la placa de conexión del apoyo fijo, por lo que en las siguientes pruebas se redujo la longitud de la placa de conexión del apoyo fijo para que se pudieran alcanzar ductilidades mayores a las obtenidas.

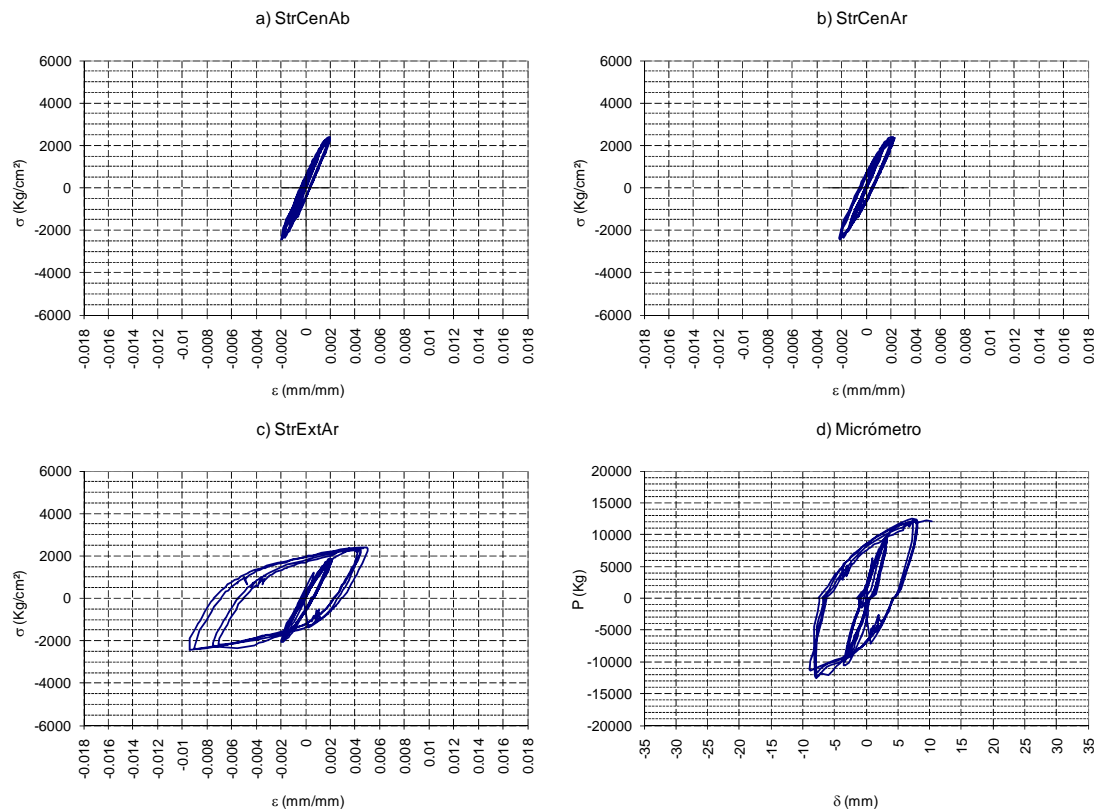
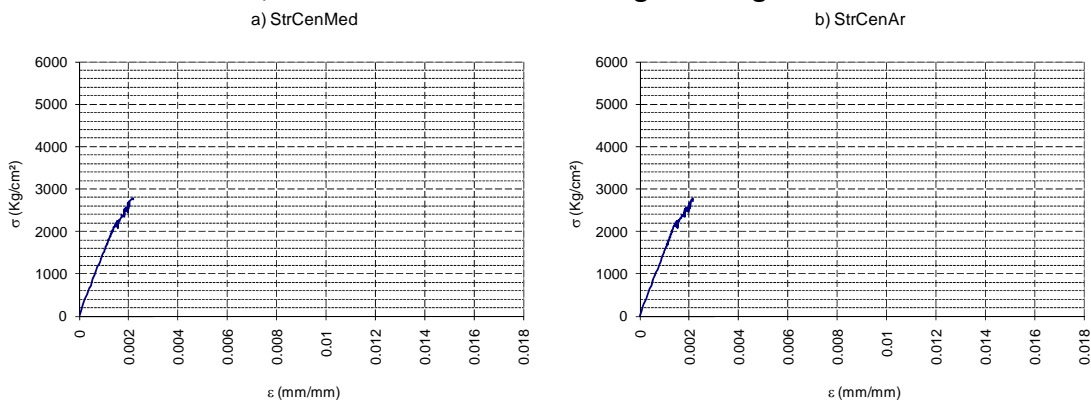


Figura 4.25. Diagrama de histéresis del espécimen 12.

- Resultados espécimen 13

El espécimen 13 fue construido con el arreglo de tubo, el cual se ensayó solo a compresión para estudiar el comportamiento del elemento a ese tipo de carga. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la figura 4.26, donde se observa un buen comportamiento a nivel local del elemento, debido a que al no haber inversión de carga, no hubo deslizamiento de los tornillos.

En el extremo se observan ductilidades del orden de 8 y en el centro de 1.5, por lo que para futuras investigaciones se propondría reforzar la zona extrema y/o reducir la zona central en un 90%, tal como se hizo con el arreglo de ángulos.



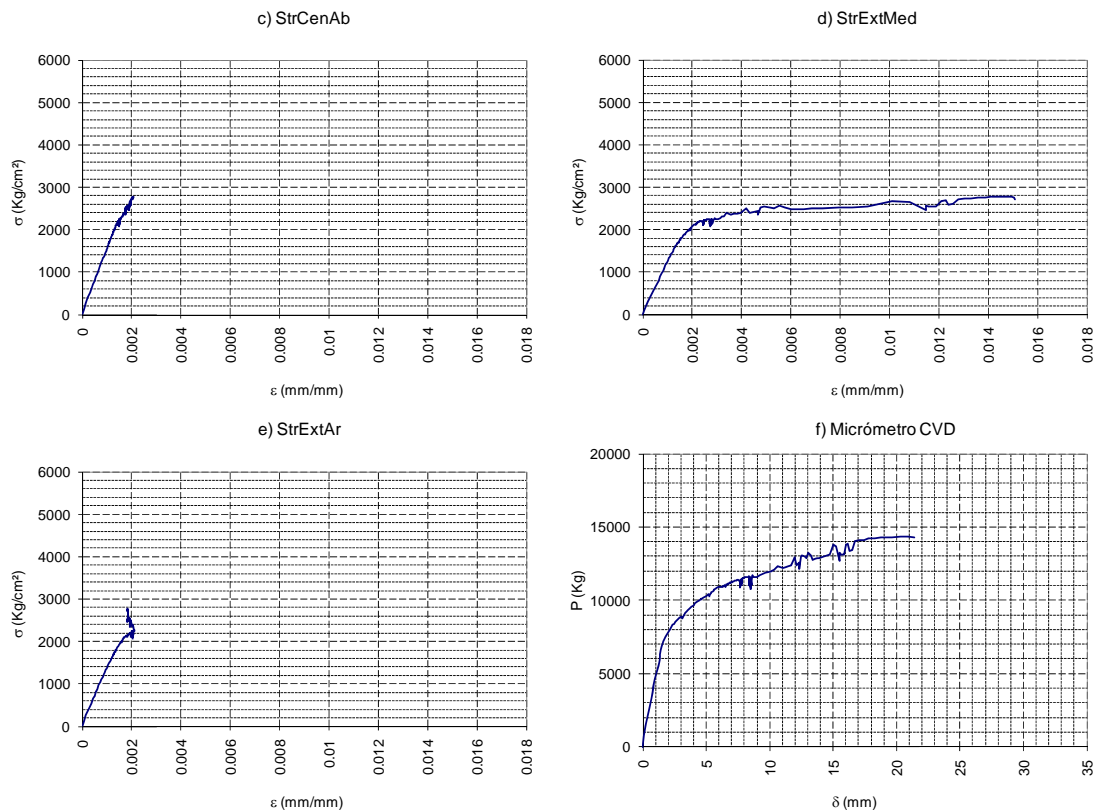
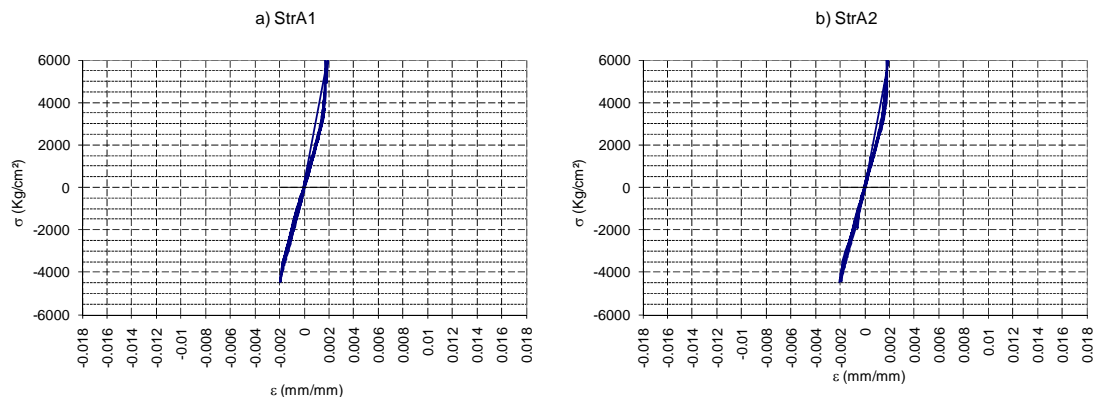


Figura 4.26. Diagramas esfuerzo-deformación y carga desplazamiento del espécimen 13

- Resultados espécimen 14

El espécimen 14 se ensayó con el protocolo de carga mostrado en la figura 4.2. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la figura 4.27, donde se observa que el elemento no fue capaz de desarrollar comportamiento inelástico, a pesar de que se tenía la sección reducida de los ángulos en un 90% en el centro del contraviento y se esperaba que fuera una zona de fluencia controlada.



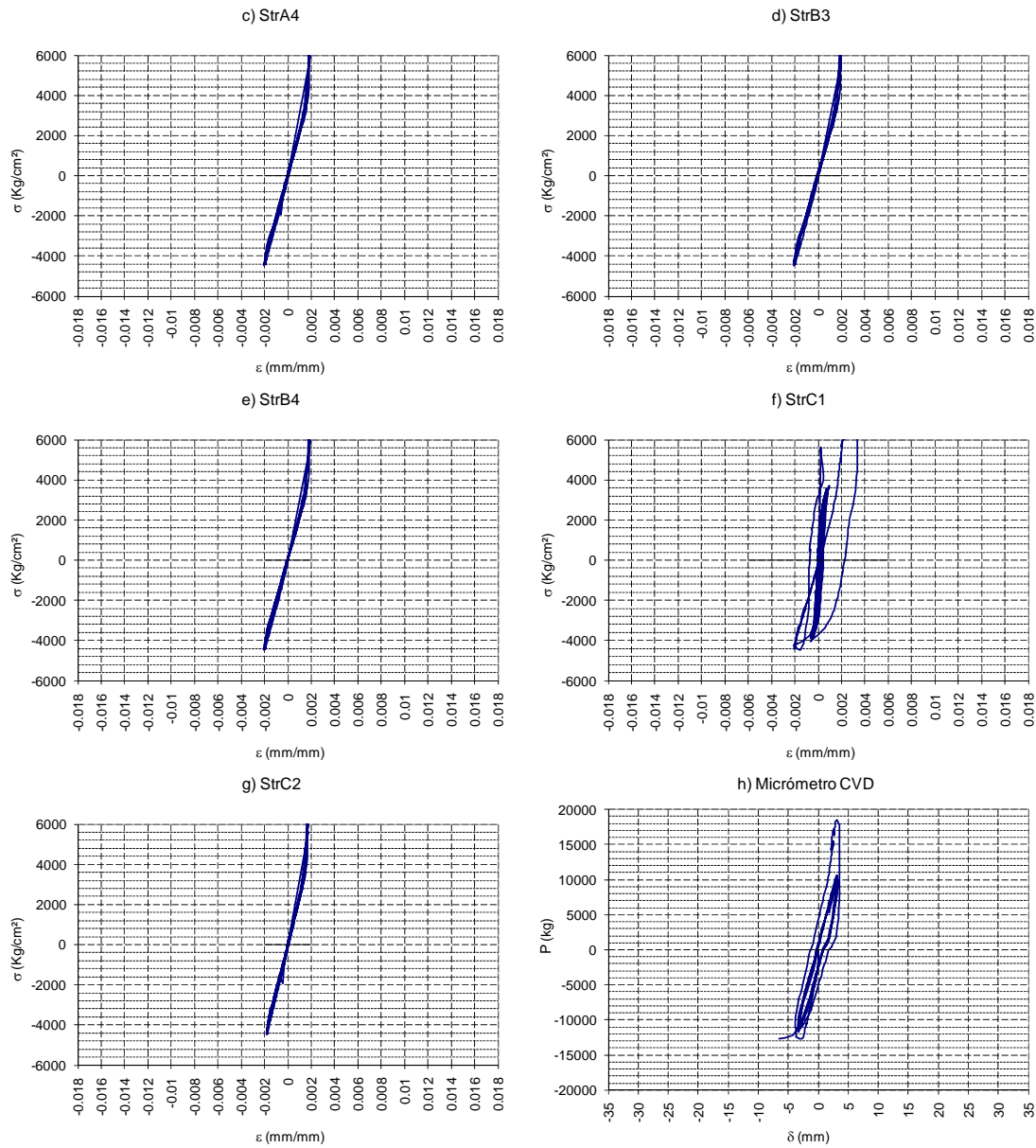


Figura 4.27. Diagrama de histéresis del espécimen 14.

La prueba no se completó debido a problemas en el dispositivo de carga producidos por el uso acumulado durante las pruebas anteriores.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En el presente capítulo se presenta el análisis de los datos obtenidos de los ensayos de los CVD's, así como una descripción de los resultados de cada uno de los especímenes.

Para cada uno de ellos se realizó un análisis del ciclo histerético, comparando las cargas de tensión y compresión para evaluar la diferencia de carga axial (Uang 2003) a cada ductilidad asociada a los patrones de carga que se indicaron en el capítulo 4.

La diferencia de carga axial se evaluó mediante la expresión (5.1):

$$\Gamma = \frac{|P_C| - P_T}{P_T} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde Γ es la diferencia de carga axial para una deformación ε_i , mientras que P_C y P_T son las cargas de compresión y tensión, respectivamente, medidas a un nivel de dicha deformación ε_i .

En las figuras 5.1 a 5.5 se presentan las diferencias de carga axial para los diferentes elementos ensayados. Cabe mencionar que solamente se reportan los resultados de los elementos que desarrollaron comportamiento inelástico, conforme lo discutido en el capítulo anterior.

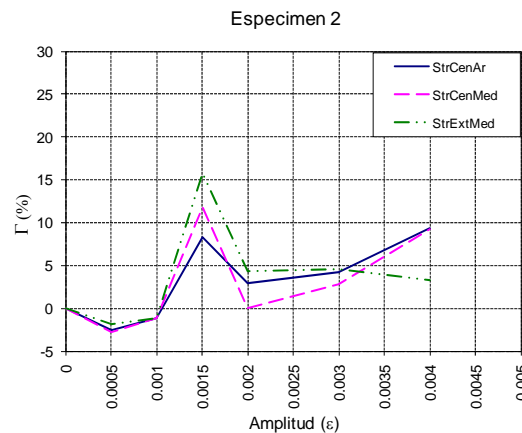


Figura 5.1. Diagrama de amplitudes y diferencia de carga axial del espécimen 2.

Para el espécimen 2 se observa un buen comportamiento en cuanto a diferencia de carga axial (Γ). Dichos valores son del orden del 15% para amplitudes cercanas a la deformación unitaria de fluencia y del 5 al 10% para deformaciones mayores a la fluencia. Esto es debido a que, para niveles de carga bajos, existe cierta fricción entre el núcleo y el

mortero y al aumentar el nivel de deformación la fuerza aplicada vence la fuerza de fricción, disminuyendo Γ . Note que para deformaciones pequeñas se tienen valores de Γ negativos (es decir, para un mismo nivel de deformación la fuerza de tensión es mayor que la fuerza en compresión). En este caso, los resultados pueden deberse a un reacomodo de los dispositivos de carga y medición para los niveles pequeños de carga.

Como se observa en la figura 5.2, el espécimen 3 exhibió un buen comportamiento en cuanto a Γ . Las diferencias de carga axial para amplitudes pequeñas son ligeramente mayores que en amplitudes grandes. El máximo valor de Γ es del orden del 8%.

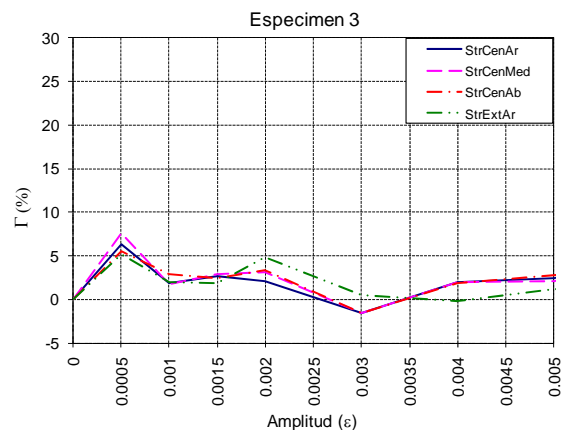


Figura 5.2. Diagrama de amplitudes y diferencia de carga axial del espécimen 3.

Los resultados presentados en la figura 5.3 muestran que el espécimen 4 tuvo un comportamiento similar al del espécimen 2. La diferencia de carga axial va del 10%, para deformaciones cercanas a la fluencia, a 4% para deformaciones mayores a la fluencia. El espécimen 2 fue fabricado con goma, pintura y grasa asfaltada como materiales antiadherentes, mientras que el espécimen 4 fue fabricado con silicón y grasa asfaltada; por lo tanto, los resultados sugieren que el material que controla principalmente la diferencia de carga axial es la grasa asfaltada.

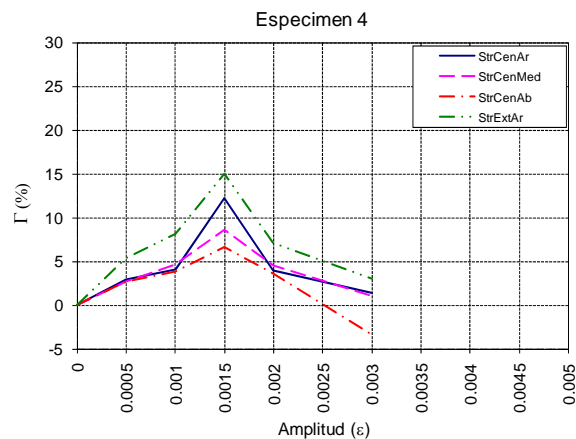


Figura 5.3. Diagrama de amplitudes y diferencia de carga axial del espécimen 4.

Para el espécimen 7 se muestran valores de Γ negativos, lo que indica que la fuerza desarrollada a compresión es menor que la de tensión, incluso con valores del orden 20% en amplitudes pequeñas. Como se puede observar en la figura 4.15, se tuvo un deslizamiento importante del núcleo respecto a la camisa en este ensaye. En altos niveles de deformación la desadherencia negativa podría explicarse por la aparición de un modo superior de pandeo en el núcleo; sin embargo, para niveles pequeños de deformación esto no debería observarse.

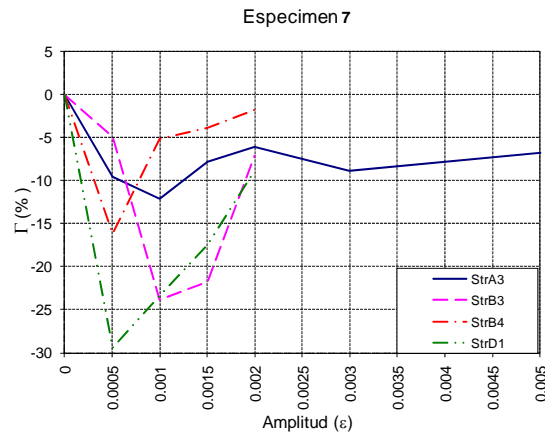


Figura 5.4. Diagrama de amplitudes y diferencia de carga axial del espécimen 7.

El espécimen 9 muestra valores de Γ para amplitudes pequeñas del orden de 16% y para una amplitud de fluencia de 11%, indicando un buen comportamiento. Sin embargo, la instrumentación interna no mostró resultados confiables más allá de ductilidades de fluencia.

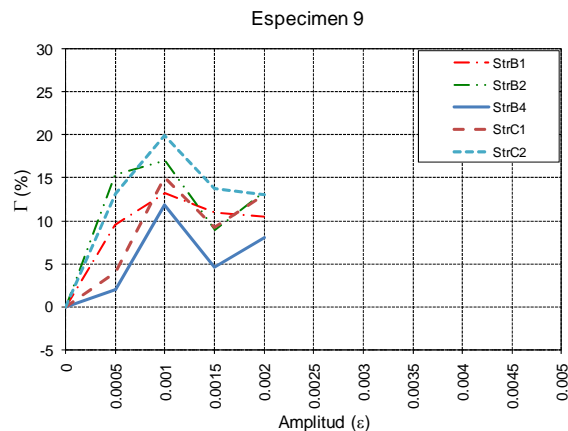


Figura 5.5. Diagrama de amplitudes y diferencia de carga axial del espécimen 9.

El ciclo histerético mostrado en la figura 4.19 correspondiente al espécimen 9, exhibe uno de los mejores comportamientos de los obtenidos en la presente investigación, logrando ductilidades del orden de 7 y modo de pandeo superior. La falla fue a compresión en el centro del contraviento en la zona de fluencia controlada, donde se realizó una disminución del área en un 90% y refuerzo en el extremo, por lo que se considera que este es el detallado óptimo para este tipo de arreglo de contravientos.

El espécimen 13 se ensayó solo a compresión, por lo que no se puede mostrar su diagrama de diferencia de carga axial contra amplitud pero en la grafica 4.26 se muestra que tuvo un buen comportamiento logrando una ductilidad del orden de 8.

En la tabla 5.1, se muestra un resumen de los especímenes que mostraron buen comportamiento inelástico.

Tabla 5.1 Resumen de diferencia de carga axial

Especimen	Núcleo	Γ (%)	Ductilidad máxima
2	Tubo circular	15	6
3	Tubo circular	8	5
4	Tubo circular	10	2
7	Ángulos	20	6
9	Ángulos	11	7

Capítulo 6

Conclusiones

En este estudio se trató de desarrollar un contraviento restringido contra pandeo que permitiera un comportamiento histerético estable en el contraviento, utilizando dos diferentes núcleos y diversos materiales antiadherentes.

En cuanto a los materiales antiadherentes, se observó que, en general, todas las combinaciones consideradas condujeron a un comportamiento adecuado. Los niveles de desadherencia alcanzados son comparables e incluso menores que los observados en investigaciones similares.

En cuanto a los diferentes núcleos considerados, el núcleo circular mostró un comportamiento más estable; sin embargo es difícil encontrar en el mercado mexicano un tubo con el esfuerzo de fluencia requerido para aplicaciones prácticas. El núcleo de ángulos resulta una mejor opción para posibles aplicaciones prácticas, siempre y cuando se detallen adecuadamente los extremos del contraviento para evitar concentraciones de esfuerzos excesivos que originen la falla del núcleo en el extremo.

El arreglo de ángulos con refuerzo en los extremos y sección reducida en el centro del 90%, tuvo un excelente comportamiento, presentando un modo de pandeo superior. La falla se presentó en la zona de fluencia controlada, por lo que se recomienda usar este tipo de detallado.

En un número importante de especímenes se presentaron fallas en la soldadura de unión entre el núcleo y las placas de conexión del contraviento. Por lo tanto, para evitar este tipo de falla, se sugiere establecer un protocolo de revisión de la soldadura para fabricar este tipo de dispositivos. En una primera etapa se deben realizar pruebas de líquidos penetrantes y radiografías y, en una segunda, etapa se deben ensayar núcleos a tensión monotónicamente creciente para verificar la capacidad de deformación de la conexión.

Este estudio es el primer paso para el desarrollo de un contraviento restringido contra pandeo. Para su posible aplicación en estructuras reales hace falta realizar una mayor investigación experimental en cuanto al efecto de la velocidad de carga y a la forma en que debe conectarse el contraviento a una estructura real. Sin embargo, este estudio sienta las bases para el desarrollo y aplicación de este tipo de dispositivos a estructuras en nuestro país.

Referencias

Bruneau M, Uang C. M. y Whittaker A. (1998), "Ductile Design of Steel Structures", *Primera Edición*, Mc Graw Hill.

Coeto G. (2008), "Control de la respuesta sísmica de edificios altos por medio de un sistema de contravientos desadheridos", *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México.

Departamento del Distrito Federal. "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias" México, 2004.

Gama Estrada E. (2006). "Estudio Experimental de Contravientos desadheridos" *Proyecto Terminal de Ingeniería Civil I y II*. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México.

Gama Estrada E, Santos Téllez R, Arroyo Espinoza D. y Terán-Gilmore A (2008), "Estudio experimental en contravientos desadheridos", *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Veracruz, Veracruz.

Sabelli R, (2000), "Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames", *The 2000 NEHRP Profesional Fellowship Report*, EERI.

Santos Téllez R. (2008). "Dispositivo de Ensaye para Contravientos Desadheridos" *Proyecto terminal de ingeniería Civil I y II*. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México.

Terán-Gilmore A y Virto N. (2006), "Diseño basado en Desplazamientos de Edificaciones Bajas Rigidizadas con Contravientos Desadheridos", *Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco.

Tremblay R. et al (2003). "Seismic testing and performance of buckling restrained bracing systems", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, 2006. pags. 183-198.

Uang C. M. y Nakashima N. (2003). "Steel Buckling-Restrained Braced Frames", *Earthquake Engineering: Recent Advances and Applications*, Chapter 16, Bozorgnia and Vitelmo V. Bertero, págs. 1-26.

Virto N. (2006). "Sistema pasivo de disipación de energía para edificios de mediana altura desplantados en la zona del lago del Distrito Federal" *Tesis de Maestría*. Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. México